PLAN GÉNÉRAL
E L'ENCYCLOPÉDIE PHOTOMÉTRIQUE

PREMIÈRE SECTION

GÉNÉRALITES

Ch. Fabry .... Introduction générale à la photométrie (*paru*).
Institut d'Optique .... Sources et sélecteurs de radiations.
J. Dufay .... Diffuseurs.
A. Guntz et F. Croze. Effets de luminescence. Ecrans fluorescents.

DEUXIÈME SECTION

PHOTOMÉTRIE PHYSIQUE

D. Chalonge et
J. Lecomte .... Mesure énergétique des radiations. Spectrophotométrie absolue.
H. Buisson .... Photométrie par noircissement photographique. Microphotométrie.
L. Dunoyer .... Photométrie par effets photoélectriques.

TROISIÈME SECTION

PHOTOMÉTRIE VISUELLE

H. Piéron .... Bases psychophysiologiques de la photométrie visuelle.
P. Fleury .... Etalons photométriques.
Ch. Fabry .... Méthodes et instruments de la photométrie visuelle.
G. Guadet .... Colorimétrie.

QUATRIÈME SECTION

CAS EXTRÊMES

PLAN GÉNÉRAL
DE L'ENCYCLOPÉDIE PHOTOMÉTRIQUE



PREMIÈRE SECTION

GÉNÉRALITES

Tome I.	Ch. Fabry	Introduction générale à la photométrie (*paru*).
— II.	Institut d'Optique	Sources et sélecteurs de radiations.
— III.	J. Dufay	Diffuseurs.
— IV.	A. Guntz et F. Croze.	Effets de luminescence. Ecrans fluorescents.

DEUXIÈME SECTION

PHOTOMÉTRIE PHYSIQUE

Tome I.	D. Chalonge et J. Lecomte	Mesure énergétique des radiations. Spectrophotométrie absolue.
— II.	H. Buisson	Photométrie par noircissement photographique. Microphotométrie.
— III.	L. Dunoyer	Photométrie par effets photoélectriques.

TROISIÈME SECTION

PHOTOMÉTRIE VISUELLE

Tome I.	H. Piéron	Bases psychophysiologiques de la photométrie visuelle.
— II.	P. Fleury	Etalons photométriques.
— III.	Ch. Fabry	Méthodes et instruments de la photométrie visuelle.
— IV.	G. Guadet	Colorimétrie.

QUATRIÈME SECTION

CAS EXTRÊMES

Tome I.	R. Mesny	Mesure du rayonnement des radiations hertziennes.
— II.	A. Dauvillier	Mesure de l'intensité des rayons X et des rayons gamma. Dosimétrie radiologique.
— III.	J. Cabannes	Mesures sur les rayonnements très faibles.
— IV.	Mme Moreau	Mesures sur les rayonnements brefs ou fugitifs.

CINQUIÈME SECTION

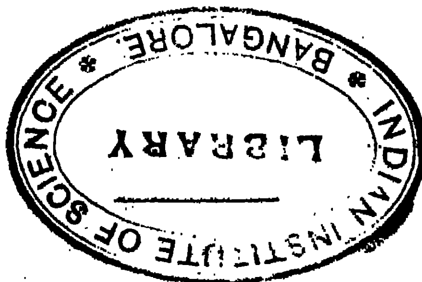
MESURES SUR L'ÉMISSION

SIXIÈME SECTION

MESURES SUR L'ABSORPTION, LA RÉFLEXION ET LA DIFFUSION

SEPTIÈME SECTION

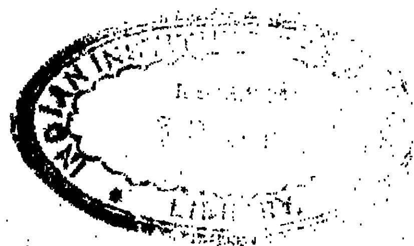
DOSAGES LUMINEUX



ENCYCLOPÉDIE PHOTOMÉTRIQUE

TROISIÈME SECTION

PHOTOMÉTRIE VISUELLE



ENCYCLOPÉDIE PHOTOMÉTRIQUE

Troisième Section. — Photométrie visuelle



Tome II

ÉTALONS PHOTOMÉTRIQUES

PAR

Pierre FLEURY

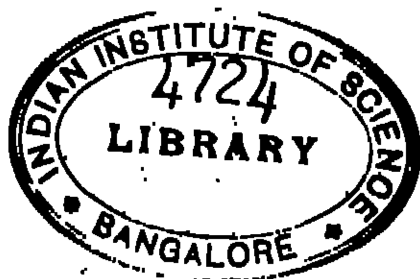
PROFESSEUR À LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

Préface de M. Charles FABRY, Membre de l'Institut

Editions de la *Revue d'Optique théorique et instrumentale*

165, rue de Sèvres; 3 et 5, boulevard Pasteur, Paris (xve)

1932


INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE
4724
LIBRARY
BANGALORE

PRÉFACE

A la base de toute science qui n'est pas purement descriptive se trouve un « système d'unités » dérivant d'un certain nombre d'unités fondamentales ; chacune de celles-ci doit être définie avec précision, soit en partant d'un phénomène naturel, soit au moyen d'étalons matériels invariables. Les problèmes que pose cette réalisation des étalons sont résolus d'une manière satisfaisante pour les unités que l'on rencontre dans les mesures géométriques, mécaniques et électriques. Parfois même on se trouve avoir le choix, pour une même unité, entre plusieurs définitions que l'on a su rendre parfaitement concordantes; c'est ainsi que l'unité de longueur est officiellement définie par un étalon matériel, le « Mètre étalon », mais que, en l'absence de celui-ci ou d'une de ses copies, on peut définir l'unité de longueur avec la même précision, au moyen de la longueur d'onde d'une radiation lumineuse spontanément émise dans des conditions déterminées.

Les choses sont loin d'être aussi avancées pour l'étalon photométrique, et il n'y a pas lieu d'en être surpris, car le problème est beaucoup plus ardu que pour la plupart des autres étalons. Soit que l'on s'adresse à un phénomène naturel, soit que l'on cherche à réaliser un étalon matériel, on se heurte à de grandes difficultés. Depuis le jour, qui remonte aux débuts de l'industrie du gaz, où des raisons commerciales posèrent impérieusement le problème, des efforts considérables ont été faits pour le résoudre ; encore de nos jours aucune des solutions adoptées ne peut être regardée comme vraiment définitive. La lampe électrique à incandescence, étalon matériel jusqu'à un certain point comparable au « Mètre étalon », constitue la solution habituellement adoptée depuis un certain nombre d'années ; son emploi a été un grand progrès, mais sa fragilité, son altérabilité pendant les périodes d'utilisation, rendent son emploi assez délicat et exigent des soins constants pour la simple conservation de l'unité qu'elle représente ; on pourrait la comparer à un mètre étalon dont la longueur changerait un peu après chaque comparaison avec une autre longueur. L'ancienne solution, celle qui est basée sur l'emploi d'un étalon à flamme, ne présente pas cet inconvénient, mais elle en présente d'autres, qui limitent la précision réalisable. La solution de l'avenir sera certainement celle qui sera fournie par un étalon primaire, basé sur l'emploi d'un radiateur défini (très probablement un corps noir) porté à une température définie. Dès 1884, Violle avait cru trouver une solution, un peu sim-

plisie, de ce problème ; l'échec de cette tentative, d'autant plus retentissant que la croyance en une solution définitive avait été plus hautement proclamée, avait découragé pour longtemps les physiciens tentés de s'engager dans la même voie. Heureusement, l'espoir est revenu avec la connaissance des lois du rayonnement et les progrès de la technique des hautes températures. Des recherches approfondies sont poussées de divers côtés, et l'on peut espérer que le problème de l'étalon primaire sera bientôt résolu. Les autres étalons ne disparaîtront pas pour cela, mais leur rôle sera vraiment réduit à celui d'étalons secondaires, et toute inquiétude sur leur constance sera dissipée.

A ce travail sur le perfectionnement des étalons photométriques, M. Fleury a largement contribué par une importante série de recherches sur l'étalon primaire. On trouvera dans son livre un exposé clair et complet de la question des étalons photométriques, qui s'adresse non seulement aux personnes s'occupant de mesures photométriques, mais aussi à tous les physiciens. Ceux-ci ne pourront manquer d'être intéressés par cet exemple difficile de choix d'un étalon de mesure et par l'exposé des recherches qui restent à faire pour l'amener à la perfection, tandis que les techniciens de la photométrie apprendront d'une manière pratique comment il faut utiliser l'étalon sans lequel il n'y a pas de mesure photométrique possible.

Ch. Fabry.

INTRODUCTION

*Le développement considérable de la technique de l'éclairage depuis le début de ce siècle a donné une importance croissante aux mesures photométriques : celles-ci sont souvent longues et délicates et leur résultat peut être entièrement faussé par le manque d'exactitude ou de constance d'un étalon mal choisi ou mal employé. Aussi a-t-il paru utile de faire place, dans le plan général de l'*Encyclopédie photométrique, *à une étude détaillée des divers « étalons de lumière »* (1).

Nous nous sommes occupé spécialement ici de ceux destinés à la photométrie visuelle, sans négliger toutefois d'indiquer les services qu'ils ont pu rendre dans les autres branches de la photométrie et dans les sciences connexes (sensitométrie, pyrométrie optique, etc.). Leur étude sera d'ailleurs reprise à ce point de vue dans d'autres ouvrages de cette Encyclopédie.

Après examen des principales qualités exigibles d'un étalon d'intensité lumineuse, nous avons passé en revue rapidement les diverses sources successivement employées pour déterminer la bougie *depuis les débuts de la photométrie (chapitre 1).*

Nous avons ensuite discuté en détail les conditions d'emploi des anciens étalons à flamme (chapitre 2), et surtout celles des lampes électriques à filament incandescent qui servent actuellement à conserver l'unité d'intensité lumineuse (chapitre 3) : nous espérons que cette étude pourra rendre service aux physiciens et aux ingénieurs qui utilisent de telles lampes comme étalons secondaires, en leur rappelant les précautions qu'il est indispensable de prendre pour obtenir des résultats aussi précis que possible.

La fin de l'ouvrage est consacrée au problème de l'étalon primaire de lumière *: l'emploi d'un groupe de lampes à filament de carbone ne peut en fournir qu'une solution provisoire ; celui d'une surface de platine incandescent ou d'un arc électrique (chapitre 4) a dû être abandonné. Les propriétés du « corps noir » (tel que l'a défini Kirchhoff) semblent au contraire très favorables pour son utilisation comme source-étalon de rayonnement : nous avons exposé au chapitre 5 les principales méthodes mises en œuvre à cet effet, sans en pouvoir indiquer les résultats définitifs, car il s'agit là de recherches actuellement en pleine évolution.*

---

(1) *Cette étude d'ensemble a été faite antérieurement, d'une façon plus ou moins complète, dans les traités de photométrie cités page 107 et dans les mémoires cités aux références bibliographiques sous les numéros 20, 54, 141, 142, etc.*

En terminant cette Introduction, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre maître, M. Abraham, professeur à la Sorbonne, qui dirigea nos recherches sur l'étalon primaire de lumière à l'Ecole Normale Supérieure, — ainsi qu'à M. Fabry, membre de l'Institut, directeur général de l'Institut d'Optique, et à M. Chappuis, professeur honoraire à l'Ecole Centrale, directeur du Laboratoire de recherches physiques de la Société du Gaz de Paris, dont les conseils nous ont souvent été si utiles.

Nous devons aussi de vifs remerciements à M. Jouaust, sous-directeur du Laboratoire Central d'Electricité, qui a bien voulu nous communiquer, au sujet des étalons électriques à filament incandescent, les renseignements les plus précis concernant les mesures photométriques effectuées sous sa direction, et qui, — de même que son regretté collègue, M. Laporte, — a toujours mis une extrême obligeance à nous faire profiter de sa grande expérience. M. Guadet, directeur de la Revue d'Optique, *a apporté à la composition de ce fascicule et notamment à la correction des épreuves le même soin minutieux qu'à celle des autres tomes de l'*Encyclopédie Photométrique.

P. F.

N.-B. — *Les numéros en caractères gras et indications bibliographiques entre parenthèses renvoient aux références citées à la fin de l'ouvrage, pages 110 et suivantes.*

DU MEME AUTEUR

Dans *Fours électriques et chimie.* Presses Universitaires de France, 1924. Chapitre I. Fours à résistance métallique.

Mesures sur le rayonnement du corps noir en vue de son emploi comme étalon primaire d'intensité lumineuse. Masson, 1926.

Couleurs et colorimétrie. Conférence d'actualités scientifiques. Hermann, 1930.

ERRATA

Page 25, ligne 1. *Supprimer* : assurément.

Page 32, ligne 12. *Au lieu de : plaques photométriques, lire : plaques photographiques.*

Page 40, milieu de la figure 14. *Au lieu de* : M, *lire* : M'.

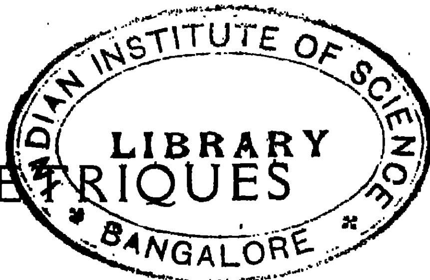
Page 75, figure 27, 8 mm à gauche de T_1. *Ajouter la lettre* : *l*.

Page 82, bas de la figure 30. *Au lieu de* : *t*, *lire* : t_1.

Page 96, ligne 2 du bas. *Au lieu de* : pour une méthode, *lire* : par une méthode.

Page 105, ligne 4. *Au lieu de :* 1 cm^2,700, *lire* : 1 mm^2,700

ÉTALONS PHOTOMÉTRIQUES



CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

1. Choix de l'étalon fondamental. — Il serait théoriquement désirable de rattacher directement les unités lumineuses aux grandeurs mécaniques fondamentales, en prenant comme étalon de flux lumineux un faisceau de radiations transportant une puissance fixée (en watts) et ayant une courbe de distribution spectrale d'énergie bien déterminée **(79, 149** *bis***)**. Mais on est encore loin d'atteindre dans les mesures absolues d'énergie rayonnante le même degré de précision que dans les comparaisons purement photométriques (¹). Il convient donc d'utiliser pour celles-ci des unités particulières. Elles dérivent toutes de l'unité d'intensité lumineuse, qui est actuellement la bougie internationale.

On a suggéré à diverses reprises de prendre plutôt, comme base de toute la série des unités photométriques, un étalon d'éclairement **(12, 19)**; mais ce dernier ne peut être réalisé qu'en éclairant un écran convenable par une source de lumière déterminée elle-même avec précision. Il ne semble donc pas **(168)** qu'il puisse y avoir aucun avantage d'ordre pratique à abandonner la méthode toujours suivie jusqu'ici d'après laquelle l'étalon photométrique fondamental est celui qui définit la bougie.

Les autres unités photométriques sont déterminées à l'aide de cet étalon et de ceux de longueur et de temps d'après les définitions rappelées dans le tableau I (page 3) (²). On a toutefois jugé commode de réaliser matériellement en plus des étalons secondaires d'intensité, des étalons de flux lumineux (et même de brillance) dérivés du précédent ; nous les étudierons plus loin.

2. Principales qualités exigibles d'un étalon d'intensité lumineuse. — Les étalons primaire ou secondaires (³) servant aux mesures photomé-

---

(¹) Il se peut toutefois que, dans un avenir plus ou moins lointain, les mesures relatives et absolues de spectrophotométrie objective se perfectionnent assez pour pouvoir servir de base à une définition de l'étalon lumineux. Voir à ce sujet une communication de Ornstein et Vermeulen au dernier Congrès International de l'Eclairage (septembre 1931).

(²) Pour plus de détails, se reporter à l'ouvrage de *Ch. Fabry* « Introduction générale à la photométrie » ainsi qu'aux Recueils des travaux de la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E 1924, p. 163 et 1928, p. 11).

(³) Rappelons que l'*étalon primaire*, qui sert à définir l'unité, n'est utilisé qu'exceptionnellement; pour les mesures usuelles, on emploie des *étalons secondaires* dont la grandeur a été déterminée avec précision, en fonction de l'unité, par une comparaison préalable avec l'étalon primaire.

triques doivent satisfaire à certaines conditions essentielles que nous allons indiquer.

a) Avant tout, comme tout étalon, ils doivent être *constants* et *reproductibles* : les variations avec le temps de la grandeur qu'ils déterminent doivent être (une fois faites, bien entendu, toutes les corrections nécessaires) très inférieures aux erreurs des mesures. Aussi les exigences des photométreurs ont-elles augmenté en même temps que la précision de leurs mesures ; celle-ci semble actuellement de l'ordre de quelques millièmes, dans les cas les plus favorables. Il est possible, comme nous le verrons, de réaliser des étalons secondaires constants à quelques dix-millièmes près; mais la reproductibilité de l'étalon primaire n'est pas, jusqu'à présent, aussi bien assurée.

b) On sait que, pour effectuer les mesures d'intensité lumineuse avec la plus grande précision possible, on doit réaliser sur l'écran photométrique un *éclairement suffisant*. On admet en général que cet éclairement doit être au moins égal à 10 lux **(14, 33, 36)**.

On est donc amené à réduire la distance x du photomètre à l'étalon d'autant plus que ce dernier est moins intense.

c) Mais cette distance doit rester assez grande devant les dimensions de la source lumineuse pour qu'on puisse, sans erreur appréciable, considérer celle-ci comme *ponctuelle*.

On peut s'astreindre, il est vrai, à donner toujours à la distance x la même valeur, ou bien encore calculer approximativement, d'après la forme et les dimensions de l'étalon et la brillance de ses diverses parties, la différence entre l'éclairement réel du photomètre et celui qu'on obtiendrait si tous les points de la source étaient confondus en son « centre ».

Pour avoir une idée sur l'ordre de grandeur de cette correction, considérons, par exemple, un élément de source A, de surface S, de brillance B, normal à l'axe Δ de l'écran photométrique P (fig. 1). Si cet élément est placé sur l'axe Δ, à une

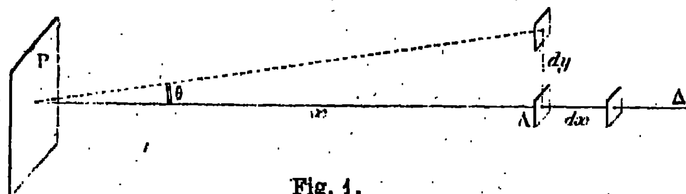


Fig. 1.

distance x de l'écran photométrique, il produit sur celui-ci un éclairement $E = \frac{BS}{x^2}$.

Si l'élément de source se déplace de dx en restant sur l'axe Δ, la variation rela-

TABLEAU I. — PRINCIPALES GRANDEURS ET UNITÉS PHOTOMÉTRIQUES

Équation de définition	Grandeur	Unités	Observations
F	Flux lumineux.	Lumen (lu) (=bougie×stéradian)	—
$I=\frac{dF}{d\omega}$	Intensité lumineuse.	Bougie internationale (b)	Les Allemands utilisent comme unité d'intensité la bougie Hefner. 1 Hefnerkerze =0,9 b internationale.
$B=\frac{dI}{dS\cos\theta}$	Brillance.	Bougie par cm² (b/cm²)	Pour une source suivant la loi de Lambert, la brillance est liée à la radiance par la formule $B(\text{b/cm}^2)=\frac{R}{\pi}(\text{lu/cm}^2)$
$E=\frac{dF}{dS}$	Éclairement.	Lux (lx = lu/m²) Phot (ph = lu/cm²) 1 phot = 10000 lux	Le lux était autrefois appelé bougie-mètre. Les Anglais utilisent encore comme unité d'éclairement le foot-candle. 1f.c=10,76 lx
$R=\frac{dF}{dS}$	Radiance.	Lumen par cm²	
$E.t$	Excitation ou quantité d'éclairement.	Lux-seconde (lx.s) Phot-seconde (ph.s) Microphot-seconde (μ ph.s)	—
$L=Ft$	Quantité de lumière	Lumen-heure (lu.h).	—
$K=\frac{F}{P_r}$	Coefficient de visibilité d'un rayonnement.	Lumen par watt (lu/w)	(P_r étant la puissance rayonnée dans le faisceau).
$\eta=\frac{F}{P_c}$	Coefficient d'efficacité d'une source de lumière.	Lumen par watt (lu/w)	(P_c étant la puissance consommée par la source).
$\frac{P_c}{F}$	Coefficient de consommation d'une source.	Watt par lumen (w/lu)	—

tive de l'éclairement E est $\frac{dE}{E} = -2\frac{dx}{x}$. Par exemple, pour $x = 1$ mètre et $dx = 1$ cm, on a (en valeur absolue) : $\frac{dE}{E} = \frac{2}{100}$.

Si d'autre part l'élément se déplace de dy suivant une perpendiculaire à l'axe Δ, l'éclairement du photomètre devient

$$E' = \frac{BS\cos^2\theta}{x^2 + (dy)^2} = \frac{BSx^2}{[x^2 + (dy)^2]^2}.$$

Sa variation relative est

$$\frac{E' - E}{E} = \left[\frac{x^2}{x^2 + (dy)^2}\right]^2 - 1,$$

ou, en valeur absolue (dy étant petit vis-à-vis de x),

$$\frac{\delta E}{E} = 2\left(\frac{dy}{x}\right)^2.$$

Pour $x = 1$ mètre et $dy = 1$ cm, $\frac{\delta E}{E} = \frac{2}{10000}$.

Pour que la source utilisée soit assimilable à une source ponctuelle, il importe donc que ses dimensions, dans le sens de l'axe Δ, soient aussi réduites que possible ; au contraire, sa largeur (mesurée perpendiculairement à Δ) peut, sans inconvénients, atteindre plusieurs centimètres.

Remarquons enfin que, même si la source est très petite, ou située dans un plan normal à l'axe du photomètre, la distance x est difficilement mesurable à moins de 1/2 mm près. Pour que l'erreur relative $\frac{dE}{E} = 2\frac{dx}{x}$ reste inférieure à $\frac{1}{1000}$ (par exemple), il faut que x soit au moins égal à 1 mètre (ce qui est d'ailleurs suffisant pour que l'écran photométrique soit uniformément éclairé) et, par suite, il faut que l'étalon ait une intensité lumineuse de *10 bougies au moins*.

d) On sait que les mesures photométriques sont d'autant plus difficiles et d'autant moins précises que les *couleurs* des lumières à comparer sont plus différentes. Il convient donc d'employer un étalon ayant la couleur des sources artificielles les plus répandues. Cette couleur est devenue de moins en moins rouge (autrement dit, la radiation dominante s'est déplacée vers les petites longueurs d'onde) à mesure que les lampes à huile et à pétrole étaient supplantées par les divers modes d'éclairage au gaz et à l'électricité. Aussi doit-on abandonner complètement aujourd'hui certains étalons (tels que la lampe Hefner) dont la couleur était acceptable il y a cinquante ans.

Le problème du choix de l'étalon reste compliqué par ce fait que les sources les plus employées actuellement ont encore une gamme de teintes très étendue

Même en laissant provisoirement de côté les cas extrêmes du tube au néon ou de l'arc au mercure, la comparaison d'un bec Auer et d'un arc électrique, ou simplement celle d'une lampe à filament de tungstène incandescent dans le vide et d'une lampe à atmosphère gazeuse, reste une opération de photométrie hétérochrome assez malaisée.

Pour réduire au minimun cette difficulté, il conviendra d'utiliser un nombre suffisant d'étalons secondaires différents, chacun d'eux ayant exactement la couleur d'un des types de sources considérés. Ainsi les mesures de photométrie courante, aussi bien dans l'industrie qu'au laboratoire, pourront être grandement facilitées, puisqu'elles porteront toujours sur des lumières homochromes. Nous verrons plus loin comment de tels étalons secondaires peuvent être réalisés ; leur étalonnage, par comparaison avec l'étalon primaire, restera la seule opération hétérochrome inévitable. Il sera fait, sinon une fois pour toutes, du moins assez rarement, dans des laboratoires spéciaux, et par un personnel bien exercé. Le choix d'une méthode unique et précise pour effectuer cet étalonnage hétérochrome pose d'ailleurs un problème très important, qui n'est pas encore complètement résolu [1].

Pour assurer la précision maximum, il convient encore que l'étalon primaire ait une couleur intermédiaire entre celles des divers étalons secondaires les plus employés. On sait que la plupart des sources usuelles ont un rayonnement dont la répartition, dans le spectre visible, est pratiquement identique à celle du corps noir à une température convenable. Cette température, qui en général diffère de la température vraie de la source, est appelée *température de couleur équivalente.* Plus elle est élevée (au-dessous de 5 000° K) [2], plus la lumière émise se rapproche de celle du jour. Le tableau II, que nous empruntons à M. Fabry (*Intr. gén. à la phot.*, p. 146), donne à titre d'exemple sa valeur approximative, pour un certain nombre de sources usuelles.

On y a ajouté, pour quelques-unes de ces sources, la longueur d'onde de la *radiation dominante* en angströms (Fabry, *loc. cit.*, p. 160).

De l'examen de ce tableau, on peut conclure que, pour la photométrie des sources artificielles les plus employées actuellement, l'étalon primaire le plus indiqué devrait avoir une température de couleur équivalente comprise entre 2 500 et 3 000° K.

e) *Les conditions d'emploi* de l'étalon choisi doivent être aussi simples que possible : il faut réduire au minimum toutes les opérations auxiliaires, telles que : réglage d'une hauteur de flamme, contrôle de la pureté du combustible, mesure

---

(1) Voir pages 44 et suivantes.

(2) Dans cet ouvrage, les températures sont toutes évaluées dans l'échelle centigrade. Elles seront suivies de la lettre C ou de la lettre K (initiale de Kelvin), suivant qu'elles seront comptées à partir du point de fusion de la glace ou à partir du zéro absolu. Par exemple, la température d'ébullition de l'eau s'écrira 100° C ou 373° K.

TABLEAU II. — COULEUR DE QUELQUES RAYONNEMENTS USUELS

	Température de couleur équivalente.	Longueur d'onde de la radiation dominante.
Lampe Hefner à acétate d'amyle.	1875° K	5910 A
Bougie de paraffine	1920	
Lampe à pétrole (mèche plate)	2045	
Acétylène (étalon Eastman Kodak)	2360	
Lampe à incandescence à filament de carbone (2,6 lumens par watt).	2070	5900
Lampe à filament de tungstène dans le vide (25 watts; 9,8 lumens par watt)	2490	5884
Lampe au tungstène dans un gaz (50 watts; 10,0 lumens par watt)	2670	
= d° = (100 watts; 12,9 lumens par watt) . . .	2740	
= d° = (Consommation non indiquée)	2848	5869
= d° = (1000 watts; 20,0 lumens par watt). . .	2980	
Arc électrique (charbons à mèche)	3420	
= d° = (charbons homogènes).	3780	5841
Lumière de la lune (à travers l'atmosphère terrestre)	4125	
Lumière moyenne du jour (lumière blanche conventionnelle)	5200	
Lumière du soleil, à travers l'atmosphère terrestre, en été, vers midi (variable)	5300 à 5600	
Ciel au nord, temps couvert.	6400 à 6900	
Ciel au nord, ciel bleu.	19000 à 24000	
Arc au mercure (¹)		4956
Arc au mercure dans le quartz (régime poussé) (¹)		5068
Bec Auer (¹)		5824

de la proportion de vapeur d'eau et de gaz carbonique dans l'atmosphère, etc. Bien entendu, cette prescription s'applique surtout aux étalons secondaires, qui servent aux mesures courantes. Quant à l'étalon primaire, si cela est indispensable pour augmenter la précision avec laquelle il est reproductible, il pourra être l'objet de spécifications très détaillées, bien qu'il soit également préférable que sa définition ne comporte qu'un nombre aussi restreint que possible de facteurs choisis arbitrairement.

f) Remarquons à ce propos qu'on peut distinguer deux sortes d'étalons pri-

(¹) Pour ces sources, aucune température de couleur équivalente ne peut être indiquée, leur rayonnement différant trop de celui du corps noir à n'importe quelle température.

maires ; les uns, que l'on appelle parfois *étalons de première espèce*, sont parfaitement déterminés par leur définition même : il suffit d'avoir le texte de celle-ci pour pouvoir les reproduire avec toute la précision désirable. Tel est le cas, par exemple, de l'ohm international (si on suppose fixées les unités de masse et de longueur). Les *étalons de deuxième espèce*, au contraire, ont été matériellement réalisés une fois pour toutes : on en a fait des copies, que l'on a comparées à l'étalon primordial, — mais si celui-ci et toutes ses copies se trouvaient brusquement détruits ou altérés, on ne saurait pas les reproduire.

Il est clair que les étalons de deuxième espèce sont moins satisfaisants que les autres, parce que leur choix comporte plus de facteurs arbitraires, et surtout parce qu'on n'est jamais absolument sûr qu'ils ne se modifient pas peu à peu. Les copies, en effet, peuvent s'altérer de la même façon que leur modèle, d'autant plus exactement qu'elles lui sont plus semblables.

Les étalons de cette catégorie ne sont pourtant pas toujours suspects : le mètre en fait partie, et on a toutes raisons d'admettre que, depuis son adoption, il ne s'est modifié que de quantités tout à fait négligeables, et qu'il en sera de même pendant des siècles encore. D'autre part, ses copies sont assez nombreuses et assez disséminées pour qu'on n'ait pas à redouter de les voir disparaître toutes à la fois. Il n'en est pas moins vrai qu'il a paru extrêmement important de comparer ce mètre à d'autres longueurs dont la stabilité semblait encore plus assurée, — notamment à une certaine longueur d'onde du spectre du cadmium. En fait, c'est cette radiation qui est maintenant le véritable étalon primaire de longueur, et c'est un étalon de première espèce.

La *bougie internationale* est actuellement définie à l'aide d'un groupe de lampes à incandescence constituant un étalon de seconde espèce dont la sécurité peut paraître encore insuffisante. Mais peut-être un avenir assez proche verra-t-il réaliser un étalon lumineux primaire de première espèce, satisfaisant aux conditions de reproductibilité, de constance, d'intensité, de dimensions, de couleur que nous avons indiquées.

Ce résultat n'aura été obtenu qu'après de nombreuses tentatives, dont on se fera une idée en passant rapidement en revue les principaux étalons primaires successivement employés depuis les débuts de la photométrie.

8. Revue rapide des principaux étalons primaires. — Les définitions successives de la « bougie ». — Le nom donné à l'unité fondamentale rappelle que les premières sources de comparaison utilisées furent effectivement des bougies. Mais on s'aperçut vite que leur intensité lumineuse dépend non seulement de la matière qui les constitue et du poids brûlé par heure, mais encore de la nature de la mèche, de la hauteur de flamme, etc. Ces diverses variables furent fixées autant que possible (le plus souvent par les soins des Associations de producteurs de gaz d'éclairage) et chaque pays eut son étalon : bougie

stéarique dite « de l'Etoile » en France, bougie de blanc de baleine en Angleterre, de paraffine en Allemagne, etc.

Le rapport de ces diverses unités était assez mal défini : entre les valeurs qu'en donnent les anciens traités de photométrie, on trouve des divergences considérables, souvent supérieures à 20 0/0. C'est que les mesures étaient encore peu précises, et surtout que les bougies étaient des étalons très inconstants.

On les employa pourtant, dans divers pays étrangers, jusque vers 1880, alors qu'en France un progrès sensible avait été réalisé depuis longtemps par l'emploi de lampes Carcel, à huile de colza. L'intensité lumineuse de ces lampes, dans des conditions qu'ont précisées avec un grand soin *Dumas et Regnault* (1860) **(38)**, était plus constante que celle des bougies (ses variations dépassant rarement 5 0/0) ; elle déterminait une nouvelle unité, le *carcel*, égale à environ 10 bougies.

En 1879 et 1884, *Violle* proposa d'adopter comme unité l'intensité lumineuse émise en direction normale par 1 centimètre carré de la surface d'un bain de platine pur fondu, en train de se solidifier, intensité qu'il avait trouvée égale à 2,08 carcels **(164)**.

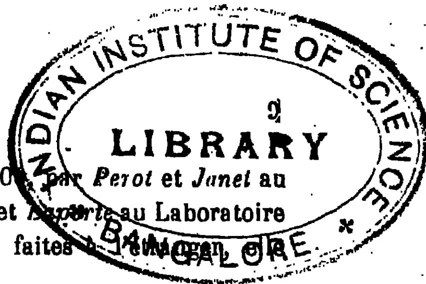
Cette définition, très séduisante par sa simplicité et par les garanties de stabilité qu'elle semblait offrir, fut adoptée en 1884 par une Convention internationale et est encore inscrite dans la loi française. En 1889, le Congrès international des Electriciens définit une unité pratique, la *bougie décimale*, égale par convention au vingtième de l'unité précédente, c'est-à-dire à $0{,}104 = \frac{1}{9{,}6}$ carcel, d'après les mesures de Violle **(25)**.

Mais, comme nous le verrons plus loin, l'expérience montra que, contrairement aux prévisions, l'étalon Violle n'était pas reproductible avec une constance satisfaisante. La lampe Carcel, conservée comme étalon secondaire, continua donc, en fait, à jouer le rôle d'étalon primaire en France, jusqu'aux premières années de ce siècle.

En Angleterre, les étalons qui succédèrent aux bougies furent des lampes utilisant comme combustible le pentane (C^5H^{12}). *Vernon-Harcourt*, à qui elles sont dues, en a décrit, entre 1877 et 1898, cinq modèles successifs. Le dernier a, dans les conditions fixées par le constructeur, une intensité de 10 *bougies anglaises* **(163)**.

Quant aux Allemands, ils emploient, depuis 1884, l'étalon Hefner ; c'est une lampe de construction assez simple (un peu analogue à celle de nos lampes « Pigeon »), où l'on brûle de l'acétate d'amyle. Dans des conditions atmosphériques déterminées, et quand la hauteur de flamme est bien réglée, son intensité lumineuse est par définition, 1 *bougie Hefner* **(136)**.

Les trois principaux étalons à flamme : Carcel, Vernon-Harcourt, Hefner ont été employés concurremment pendant de longues années ; il parut indispensable de déterminer le rapport des unités qu'ils servaient à définir. Cette comparaison fut



faite à diverses reprises, et notamment en France, en 190[illegible], par *Perot* et *Janet* au Conservatoire National des Arts et Métiers, et par *Jouaust* et *Laporte* au Laboratoire Central d'Electricité. En bon accord avec les mesures faites à l'étranger, elle conduisit au résultat suivant :

$$1 \text{ bougie décimale française} = 1 \text{ bougie anglaise} = \frac{1}{0,9} \text{ bougie Hefner}$$

à moins de 2 0/0 près environ **(73, 97)**.

On ne pouvait prétendre à une précision plus grande, à cause des variations d'intensité des étalons à flammes. Ceux-ci ont d'ailleurs de graves défauts, sur lesquels nous reviendrons en détail au chapitre 2.

Aussi leur a-t-on préféré des *lampes à incandescence* quand on a sû préparer et utiliser celles-ci dans des conditions telles que leur intensité lumineuse reste suffisamment constante (voir chapitre 3). Dès les premières années de ce siècle, les principaux laboratoires d'étalonnage ont fait construire un certain nombre de lampes à incandescence à filament de carbone, de forme commode pour l'usage auquel on les destinait. Après un traitement convenable, on choisit celles d'entre elles qui paraissaient présenter les plus grandes garanties de stabilité, on mesura leurs intensités lumineuses relatives, et on détermina la valeur moyenne de leurs intensités (en bougies), par comparaison avec les étalons antérieurs. Ces lampes conservées depuis lors avec le plus grand soin, ne sont utilisées qu'à de rares intervalles, pour le calibrage d'étalons secondaires. Elles ont ainsi peu de chances de s'altérer ; de temps en temps on les compare entre elles, et si l'une a varié par rapport à toutes les autres, on la remplace par une nouvelle lampe bien choisie.

Les étalons du *Laboratoire Central d'Electricité* (Paris), du *National Physical Laboratory* (Teddington) et du *Bureau of Standards* (Washington) ont été confrontés à plusieurs reprises. Ces trois laboratoires se sont mis d'accord, en 1909 **(84)**, pour adopter une unité commune, la *bougie internationale*, déterminée comme nous venons de l'indiquer, à l'aide de lampes à filament de carbone : elle est égale à l'ancienne bougie décimale française, mais définie avec une plus grande précision.

La loi française du 2 avril 1919, complétée par le décret du 26 juillet 1919, s'exprime ainsi :

« L'unité principale d'intensité lumineuse est la bougie décimale, dont la valeur est le vingtième de l'étalon Violle... Elle est représentée pratiquement et d'une manière permanente par une fraction déterminée de la moyenne des intensités moyennes, mesurées perpendiculairement à l'axe, d'au moins cinq des lampes à incandescence déposées au Conservatoire des Arts et Métiers [1]. »

La Commission Internationale de l'Eclairage, groupant les Comités Nationaux américain, anglais, français, italien et suisse, a dans sa cinquième session (Paris,

---

[1] Ces lampes proviennent en fait du Laboratoire Central d'Electricité.

juillet 1921) adopté la *bougie internationale* (C. I. E. 1921, p. 40), comme unité fondamentale. Les autres unités photométriques : lumen, lux, etc... dérivent de la précédente comme nous l'avons rappelé plus haut.

Ces unités sont également utilisées en Hollande, en Espagne, au Japon, en Russie... Mais l'Allemagne et certains pays voisins continuent à employer la bougie Hefner, qui vaut environ 0,9 (¹) bougie internationale.

Voilà donc quelles ont été, jusqu'ici, les définitions successives de la *bougie*. La dernière est-elle définitive? Ce n'est pas probable; l'étalon constitué par un groupe de lampes à incandescence présente, en effet, un caractère arbitraire assez fâcheux et surtout sa stabilité ne paraît pas garantie d'une façon absolue. Aussi cherche-t-on encore actuellement, un étalon primaire entièrement satisfaisant. Les propriétés du « corps noir » (tel que l'a défini Kirchhoff) permettent d'espérer qu'il fournira la solution de ce problème. Au cours de sa session de 1924, la Commission Internationale de l'Eclairage a décidé de l'adopter en principe comme étalon, les conditions de son emploi devant être fixées avec précision dès qu'on aura effectué un nombre suffisant d'expériences bien concordantes à ce sujet (C. I. E., 1924, p. 67 et 1928, p. 12). Sa brillance sera évaluée par comparaison avec les étalons provisoires actuels, et c'est lui qui servira, par la suite, à déterminer l'unité.

Ce *corps noir étalon* ne peut guère être construit que dans quelques laboratoires spécialement outillés; nous étudierons au chapitre 5 les tentatives faites jusqu'ici pour le réaliser. Auparavant, nous allons revoir en détail les conditions d'emploi des étalons à flamme, qui sont encore quelquefois utilisés, et surtout celles des lampes à incandescence qui, même lorsqu'elles ne serviront plus à définir la *bougie*, continueront très vraisemblablement à rendre de grands services comme étalons secondaires.

(¹) On discute encore sur ce chiffre (Voir page 21).

CHAPITRE II

ÉTALONS A FLAMME

1. Conditions à réaliser pour qu'une flamme puisse servir d'étalon photométrique. — Une source lumineuse « à flamme » est un appareil où l'on brûle, dans une atmosphère convenable, un combustible déterminé (solide, liquide ou gazeux). La lumière émise, due à l'incandescence des particules de carbone en suspension dans la flamme, dépend de la température de celle-ci, de sa forme et de ses dimensions.

Pour que la source puisse servir d'étalon, il faudra donc fixer, avec une suffisante précision :

a) La nature du combustible. — Celui-ci doit brûler complètement, tout en donnant une flamme éclairante; par suite il ne doit être ni trop riche, ni trop pauvre en carbone. Il sera caractérisé, non seulement par sa constitution chimique, mais par certaines propriétés physiques (températures de fusion et d'ébullition, densité, etc.). Une espèce chimique définie, facile à purifier, telle que l'acétate d'amyle ou l'acétylène, aura *a priori* plus de chances de donner des résultats constants qu'un mélange tel que le blanc de baleine, l'huile de colza ou le gaz d'éclairage ;

b) La forme et les dimensions de l'appareil où se fait la combustion, la nature et la composition de la mèche (quand il y en a une), la position de la cheminée de tirage, etc. Un exemple montrera l'importance de certains de ces facteurs : il suffit de donner aux parois en maillechort du tube porte-mèche d'une lampe Hefner une épaisseur de 30/100 mm (au lieu de 15/100) — toutes autres conditions restant les mêmes — pour abaisser de 2,8 0/0 son intensité lumineuse ! (Liebenthal, p. 115) ;

c) Le poids de combustible brûlé par unité de temps. — Pour le mesurer, on peut placer l'étalon sur une balance, qui déclenche une sonnerie quand son poids a diminué d'une quantité déterminée **(93)** (fig. 2). Dans certains cas, le débit du combustible est suffisamment caractérisé par la *hauteur de la flamme*. D'où l'emploi de dispositifs convenables pour mesurer celle-ci avec précision : Krüss a construit à cet effet un viseur, constitué essentiellement par un objectif achromatique qui forme sur un écran dépoli gradué une image réelle, en vraie grandeur, de la flamme étudiée **(94)** (fig. 3). Cette mesure a dans la plupart des cas une très grande importance : ainsi, quand la hauteur de flamme d'une lampe Hefner, qui est normalement de 40 mm, augmente de 1 mm, son intensité lumineuse augmente de 2 0/0 **(143)**.

Certains étalons (Methven, Vernon-Harcourt, Féry) comportent un écran, plus petit que la flamme, et placé en avant d'elle. L'influence de la hauteur totale sur

l'intensité de l'étalon est alors très diminuée, mais n'est pas complètement annulée (à cause notamment des variations correspondantes de la température de la flamme);

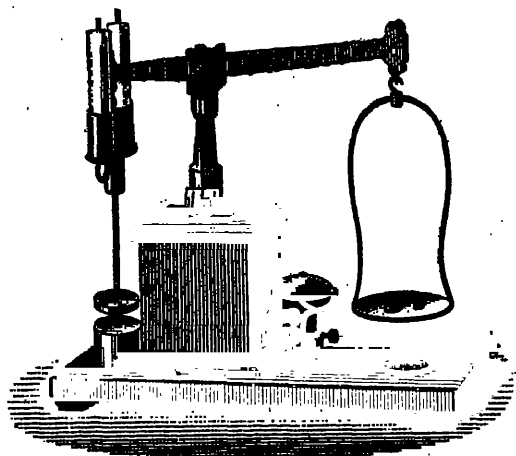


Fig. 2. — Balance pour déterminer la vitesse de combustion des bougies-étalons.

d) Enfin, *l'état de l'atmosphère* dans laquelle se fait la combustion a une influence considérable sur la lumière émise. Il est indispensable d'opérer dans une

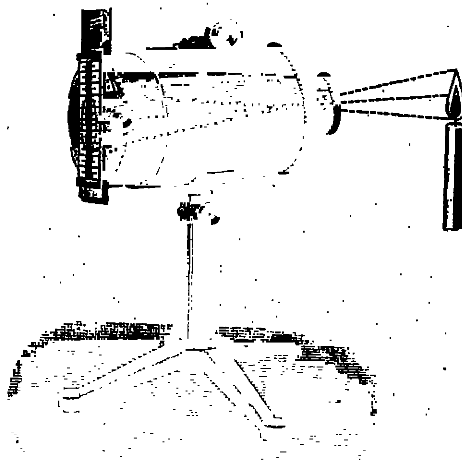


Fig. 3. — Viseur de flamme de *Krüss*.

salle bien ventilée, pour que la proportion d'oxygène et de gaz carbonique dans l'air reste constante, malgré la combustion de la lampe et la respiration des observateurs : faute de cette précaution, l'abaissement d'intensité lumineuse pourrait

atteindre, dans une petite salle, 10 0/0 au bout de 1 heure ! **(126)**. Il faut toutefois éviter les courants d'air violents, qui feraient vaciller la flamme et pourraient, en refroidissant la lampe, modifier son régime.

L'intensité lumineuse varie, d'autre part, avec la pression atmosphérique et l'état hygrométrique de l'air : suivant l'heure, le jour et la saison, ces variations peuvent dépasser 10 0/0. La loi de variation, peu connue pour les anciens étalons, a été étudiée à maintes reprises pour les lampes Hefner et Vernon-Harcourt, comme nous le verrons plus loin. On peut ainsi, au prix de mesures auxiliaires assez délicates, et par l'emploi de formules de correction plus ou moins sûres, ramener les résultats des mesures à ce qu'on obtiendrait dans des conditions « normales » de pression et d'humidité.

Des essais de combustion d'un gaz dans l'oxygène pur et sec n'ont pas donné, jusqu'ici, de résultats très supérieurs à ceux qu'on obtient dans l'air ordinaire.

Les remarques qui précèdent indiquent les graves difficultés auxquelles se sont heurtés les photométreurs dès qu'ils ont cherché à employer les étalons à flamme pour des mesures précises : voyons jusqu'à quel point on a pu les surmonter.

2. Les étalons anciens : bougies, lampe Carcel. — Les bougies, qui servaient à Bouguer et à ses successeurs, ont été complètement abandonnées, en tant qu'étalons photométriques, depuis la fin du siècle dernier. On peut se demander toutefois si, aujourd'hui encore, elles ne pourraient pas servir d'étalons secondaires commodes, pour des mesures de faible précision.

Malheureusement, si on les emploie sans aucune précaution ni mesure auxiliaire, leur intensité lumineuse ne peut être garantie à 50 0/0 près **(146, 148)**. On s'est livré, sur les « bougies-étalons » dont la composition avait été fixée avec précision (*), à de nombreuses recherches en vue de déterminer les lois de variation

(*) Les caractéristiques approximatives des bougies qui furent les plus employées sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU III

	Bougie française de l'Étoile (2 modèles)	London Standard spermaceti candle	Deutsche Vereins Paraffin-kerze	Münchener Stearinkerze
Matière.	Stéarine.	Blanc de baleine.	Paraffine (parfois additionnée de 10 à 15 °/₀ de stéarine.	Stéarine.
Point de fusion.	Environ 55° C (stéarine pure : 61°).	Environ 44° C.	Environ 55° C.	Environ 55° C.
Poids.	100 g. | 83,6 g.	75,7 g.	50 g	108,9 g.
Diamètre.	20 à 22 mm.	20 à 22,5 mm.	20 mm.	20,5 à 23 mm.
Mèche.	81 fils.	3 torons de 21 fils	25 fils.	50 brins.
Consommation horaire normale	10 g.	7,77 g.	7,5 g.	10,4 g.
Haut^r de flamme normale.	52,4 mm.	45 mm.	50 mm.	56 mm.
Intensité horizontale approximative en carcels, d'après Monnier	0,120. (23).	$0{,}13_4$	$0{,}15_2$.	$0{,}13_4$.

de leur intensité lumineuse avec la hauteur de flamme, et avec la consommation de matière combustible. On s'attacha aussi à étudier l'influence de la mèche, et même de la façon dont on « mouchait » celle-ci, pour régler la hauteur de la flamme. Cette hauteur peut en effet varier beaucoup (jusqu'à 30 0/0) si on abandonne la flamme à elle-même; et ses variations sont parfois si rapides qu'il est impossible de les mesurer avec précision — même en employant l'échelle optique de Krüss.

Mais les mesures faites par de nombreux expérimentateurs **(35, 92, 119)** [1] donnèrent des résultats très discordants; cela doit tenir en partie à ce que ces opérateurs ne faisaient pas attention à l'état de l'atmosphère (pression, proportion de vapeur d'eau et de gaz carbonique), qui a sans doute sur les bougies une influence aussi grande que sur les lampes Hefner ou Vernon-Harcourt, dont nous parlerons plus loin. Pour tenir compte de cette influence, il faudrait d'abord en déterminer les lois, puis se livrer, chaque fois qu'on utiliserait les bougies comme étalons, à des mesures auxiliaires qui, s'ajoutant à celles de la hauteur de flamme et du poids de substance brûlée, leur enlèveraient entièrement l'avantage de commodité et de simplicité d'emploi. Il serait d'autre part difficile d'assurer avec assez de soin la pureté de la matière qui les constitue. Leur abandon semble donc entièrement justifié.

La *lampe Carcel* (fig. 4), inventée au début du XIXe siècle, emploie comme combustible de l'huile de colza, qu'une petite pompe, mue par un mécanisme d'horlogerie, envoie dans la mèche d'un brûleur annulaire à double courant d'air. Une cheminée en verre assure le tirage : le réservoir à huile et la pompe d'alimentation sont placés dans le pied de la lampe. La mèche reçoit un peu plus d'huile qu'il n'en est brûlé (l'excédent retombe dans le réservoir) et ne se consume qu'assez lentement. Dans les lampes dites à modérateur, un dispositif plus simple (ressort et piston) assure l'ascension de l'huile ; le bec a la même forme.

Cette lampe, qui avait servi à Fresnel pour ses travaux sur les phares, fut adoptée par Dumas et Regnault en 1860, pour les essais photométriques du gaz de la Ville de Paris. Sous leur direction, Audoin et Bérard étudièrent l'influence de la nature de la mèche, de sa hauteur au-dessus du bec, de la position de la cheminée en verre, etc., sur la consommation en huile et l'intensité lumineuse **(4)**.

Les résultats de cette étude conduisirent Dumas et Regnault à formuler pour la construction et le mode d'emploi des lampes Carcel étalons des règles précises qu'on peut trouver exposées en détail dans le mémoire original **(38)**, ou encore dans le traité de photométrie de Palaz (p. 98 à 105). Nous ne les reproduirons pas, cet étalon n'étant plus du tout employé ; rappelons seulement que la lampe devait con-

[1] Leurs résultats sont reproduits dans les traités de photométrie de Palaz (p. 105 à 119) et de Liebenthal (p. 105 à 107).

sommer 42 g de combustible à l'heure, la mèche dépassant de 1 cm le tube porte-mèche, et l'étranglement du verre se trouvant à 7 mm au-dessus du bord de la mèche. Son intensité était alors, par définition, 1 « unité Carcel ».

Mais beaucoup de lampes, quoique construites avec le plus grand soin, ne permettaient pas de réaliser simultanément ces conditions; on devait donc les soumettre à une série d'essais en vue de déterminer leur meilleur régime de fonctionnement. Tant que la consommation (que l'on mesurait en plaçant la lampe

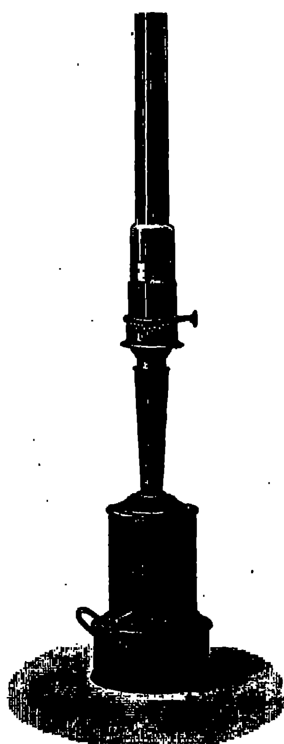


Fig. 4 *a*.

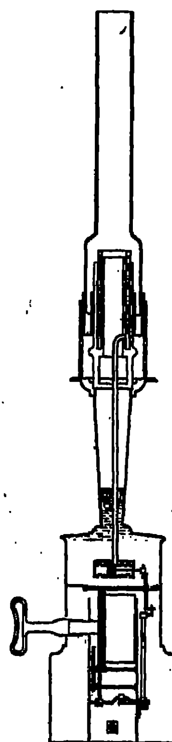


Fig. 4 *b*.

Lampe Carcel.

sur une balance convenable [figure 16, page 55] et notant le temps pendant lequel la perte de poids était de 10 g par exemple) restait comprise entre 40 et 44 grammes à l'heure, l'intensité lumineuse lui était à peu près proportionnelle. On calculait sa valeur en unités Carcel par une simple règle de trois.

La lampe Carcel a rendu de grands services en photométrie : jusqu'aux premières années de ce siècle, elle fut presque le seul étalon photométrique employé en France ; c'est elle, rappelons-le, qui, en fait, a servi primitivement à définir la bougie décimale (1 bougie décimale = 0,104 unité Carcel). Le règlement de Dumas et Regnault est resté théoriquement en vigueur pour la vérification du

gaz fourni à la Ville de Paris jusqu'en 1920 (date à laquelle on a cessé de mesurer le « pouvoir éclairant » du gaz, qui n'a plus d'intérêt depuis la généralisation de l'emploi des manchons).

En réalité, la lampe Carcel avait été supplantée vers 1905 à 1910 par les étalons électriques à filament incandescent, dont l'emploi est beaucoup plus commode et plus précis. L'intensité d'une lampe Carcel varie en effet sensiblement avec le temps écoulé depuis qu'on l'a allumée; elle ne peut guère servir que pendant 1 heure au cours de chaque expérience; il faut, pour une nouvelle mesure, remplacer la mèche ainsi que l'huile du réservoir. D'ailleurs, des huiles de provenances diverses ne donnent pas toutes les mêmes résultats, ce qui n'est pas surprenant, car l'huile de colza, même « épurée » par agitation avec un peu d'acide sulfurique, n'a pas une composition chimique rigoureusement définie.

Enfin, l'influence de la pression atmosphérique et de l'état hygrométrique de l'air sur l'intensité des lampes Carcel n'a jamais été systématiquement étudiée. On s'est borné à spécifier tardivement que le « carcel » normal correspond à une pression de 76 cm de mercure et à une humidité de 10 litres de vapeur d'eau par mètre cube d'air sec **(97, 130)**. Mais on ignore quelle est la correction à apporter aux mesures quand (comme c'est le cas général) ces conditions ne sont pas remplies; cette correction pourrait sans doute atteindre parfois 10 0/0, comme il arrive pour les autres flammes.

Ces défauts ont été signalés par maints photométreurs **(14 *bis*, 67, 126)**. D'après Rosa et Crittenden, qui se sont livrés à une importante étude d'ensemble sur les étalons à flamme **(143)**, des essais entrepris au *Bureau of Standards* pour déterminer l'influence des conditions atmosphériques sur le carcel n'ont pas été poursuivis à cause de son manque de constance. D'après les mêmes auteurs, l'intensité de cette lampe peut, en outre, varier avec la direction horizontale choisie pour la mesure.

On s'explique l'abandon de cet étalon, dont la reproductibilité n'était vraisemblablement (même au prix des précautions les plus minutieuses) guère assurée à mieux que 5 0/0 près et dont la couleur était d'ailleurs plus rouge que celle des sources employées à l'heure actuelle.

3. L'étalon Hefner. — La lampe à acétate d'amyle (fig. 5), proposée
[illegible] par von Hefner-Alteneck **(69)**, a remplacé en Allemagne, comme étalon
...trique, l'ancienne bougie de paraffine (Vereinskerze). Ses conditions
...xées avec précision en 1893 par la *Physikalische Technische Reichsanst*-
...t encore fait l'objet d'une étude très complète par Liebenthal en 1895
...6, le Congrès International des Electriciens l'a admise comme étalon
...oire « utilisable pour les besoins de l'industrie » **(7)**. C'est aujour-
...lon officiel en Allemagne et dans certains pays de langue

...s sur la figure 6. Une mèche pleine, en coton,
contenu dans le réservoir R) jusqu'au sommet du

tube T. On ne détermine pas le poids de combustible brûlé, mais on règle (en agissant sur le bouton moleté C) la hauteur de la flamme, qui doit être exactement de 40 mm. On s'en assure à l'aide du viseur optique V (analogue à celui de Krüss et remplaçant le dispositif primitif de Hefner), dans lequel une image de la flamme se forme sur un écran dépoli : le sommet de cette image doit atteindre un trait de repère.

Dans des conditions atmosphériques déterminées, l'intensité de cette lampe — pourvu qu'elle soit allumée depuis 10 minutes au moins — est ce qu'on appelle son intensité « normale ». Elle vaut, par définition, une bougie Hefner (Hefner-

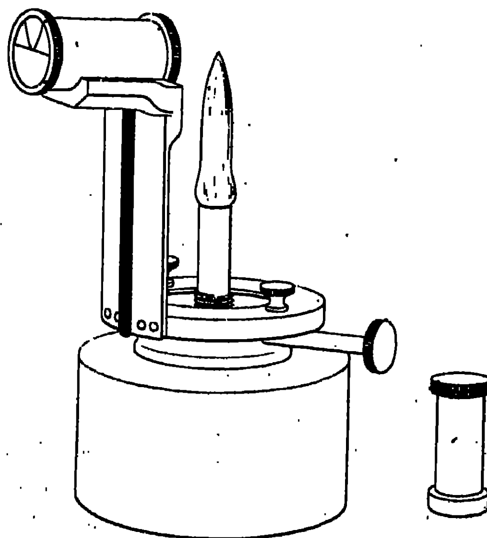


Fig. 5. — Lampe Hefner.

kerze, H. K.). On a cru d'abord que cette unité était sensiblement égale à la bougie décimale (c'est-à-dire à 0,104 carcel). Mais des mesures précises, faites notamment au Laboratoire Central d'Electricité par Laporte **(96)**, montrèrent qu'elle lui étai inférieure de 10 0/0 environ ([1]).

Les principaux facteurs pouvant agir sur l'exactitude d'un étalon Hefner sont les suivants :

a) *La construction de la lampe* doit être parfaitement conforme aux spécifications. Par exemple, comme nous l'avons rappelé plus haut, si on double l'épaisseur des parois du tube porte-mèche T (qui est normalement de 15/100 mm) l'intensité, lumineuse est abaissée de 2,8 0/0 (Liebenthal, p. 115), parce que la flamme est davantage refroidie par conductibilité. D'après Rosa et Crittenden **(143)**, il

([1]) Au sujet de l'intensité de la lampe Hefner, comparée à la bougie internationale, voir page 21.

conviendrait même de fixer avec précision la composition chimique du maillechort avec lequel ce tube est fabriqué !

L'expérience montre que deux lampes Hefner construites avec le plus grand soin, alimentées avec le même combustible, et placées dans les mêmes conditions atmosphériques, présentent souvent un écart systématique dépassant 1 0/0. A moins de se contenter d'une assez grossière approximation, on ne saurait donc prendre une quelconque de ces lampes comme étalon photométrique primaire. En fait, l'intensité « normale » des lampes contrôlées par la « Reichsanstalt » est comparée par cet Institut à celle de certaines lampes Hefner qui constituent l'étalon primaire allemand : l'écart ne doit pas dépasser 2 0/0 **(136)**.

b) *L'acétate d'amyle* ($CH^3.CO.C^5H^{11}$) employé comme combustible doit être *très pur*. C'est un liquide incolore, très odorant, de densité 0,875 à 15°C : son point d'ébullition est compris entre 138 et 140°C. On doit vérifier ses propriétés physiques, ainsi que certaines de ses réactions chimiques **(136)** et le conserver à l'abri de la lumière en flacons pleins et bien bouchés.

Les impuretés ont en général pour effet d'abaisser l'intensité lumineuse, et surtout de rendre la flamme très vacillante **(69 *bis*, 102, 106)**. On vend en Allemagne de l'acétate d'amyle spécialement contrôlé pour usage photométrique. Il est d'ailleurs assez facile de purifier ce corps, au besoin. Au point de vue de la constance du combustible, l'étalon Hefner est donc nettement supérieur aux bougies et même à la lampe Carcel. D'autre part, pour ces dernières sources le *choix de la meche* a une grande importance, parce qu'elle participe à la combustion; dans une lampe Hefner, la mèche reste très en dessous de la partie chaude de la flamme, elle ne s'encrasse et ne se consume presque pas.

c) *La hauteur de flamme* doit être réglée avec le plus grand soin : un écart de 1 mm fait varier l'intensité de 2,7 0/0 d'après Liebenthal **(100)**, 2,1 0/0 d'après Rosa et Crittenden **(143)**.

Même quand le combustible est très pur, la flamme vacille souvent, à cause de l'absence de cheminée, ce qui rend ce réglage très difficile. On ne peut l'assurer qu'à $0^{mm},2$ ou $0^{mm},3$ près (parfois $0^{mm},5$); encore faut-il surveiller constamment le viseur V. Il en résulte une incertitude de 1/2 à 1 0/0 sur l'intensité. C'est là un des graves défauts de l'étalon Hefner ; on a proposé, pour y remédier, d'entourer la flamme d'une cheminée de tôle percée de trous convenables **(34)**, mais cette pratique n'est pas généralisée. La flamme est particulièrement instable quand la température ambiante dépasse notablement 25° ; il faut donc autant que possible éviter de faire les mesures par temps trop chaud **(143)**.

d) *L'influence des conditions atmosphériques* sur l'intensité de la lampe Hefner a fait l'objet de nombreuses recherches. Celles de Liebenthal **(103)** l'ont conduit à la formule suivante :

$$I = I_n[1 - 0,0055(x - 8,8) - 0,0072(x' - 0,75) + 0,00011(H - 760)],$$

dans laquelle I est l'intensité lumineuse de la lampe quand la pression atmosphé-

rique est H (mm de mercure), et quand l'atmosphère contient x litres de vapeur d'eau et x' litres de gaz carbonique par mètre cube d'air sec. I_n est l'intensité « *normale* » (1 bougie Hefner), elle correspond à une pression de 760 mm, et à une atmosphère contenant 8,8 litres de vapeur d'eau et 0,75 litres de gaz carbonique par mètre cube d'air sec.

D'après cette formule, une variation de pression atmosphérique de 20 mm ne fait varier que de 2/1000 l'intensité lumineuse. D'autre part, dans une salle bien

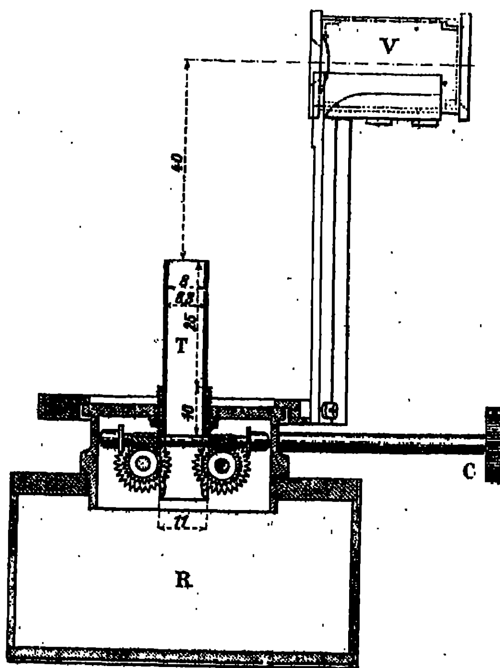


Fig. 6. — Lampe Hefner (coupe).

ventilée, la proportion de gaz carbonique reste comprise entre 0,6 et 0,9 litres par mètre cube d'air, les variations correspondantes de l'intensité sont encore très faibles. Mais il est *indispensable* d'assurer soigneusement cette ventilation (par exemple, en ouvrant largement les portes et les fenêtres tous les quarts d'heure); on peut alors négliger, dans la formule ci-dessus, le terme en $(x' - 0,75)$, dont le coefficient est d'ailleurs assez incertain. (D'après Paterson **(126)**, si le gaz carbonique est formé aux dépens de l'oxygène de l'air qui alimente la flamme, la diminution d'intensité lumineuse est 3 ou 4 fois plus grande que si l'air a conservé la proportion normale d'oxygène). S'il arrive qu'au cours d'une série de mesures la proportion de vapeur d'eau dans l'atmosphère augmente régulièrement, c'est un indice que la ventilation est insuffisante; il est souvent utile d'installer

au-dessus des lampes une hotte aspirant les produits de la combustion. Il faut d'autre part éviter les courants d'air qui feraient vaciller la flamme.

L'influence de l'état hygrométrique est très importante. Certains jours d'hiver, le terme x peut s'abaisser à 3 litres; il peut s'élever à 18 litres en été. La variation correspondante de l'intensité lumineuse dépasse 8 0/0. Il faut donc mesurer x avec précision [1] (ce qui est assez difficile) et faire soigneusement la correction, à l'aide de la formule ci-dessus.

Malheureusement, les coefficients de cette formule ne sont pas absolument sûrs : Paterson ayant trouvé des facteurs de correction sensiblement plus élevés (0,0066 par litre de vapeur d'eau, 0,0002 par mm de variation de pression) **(126)**, l'écart entre les résultats calculés à l'aide de la formule de la Reichsanstalt (Liebenthal) et à l'aide de celle du National Physical Laboratory (Paterson) pouvait atteindre 1,5 0/0, dans des conditions atmosphériques assez éloignées de la normale. On voit ainsi quelle faible précision assurent les étalons à flamme, malgré les précautions les plus délicates.

Liebenthal a proposé en 1923 **(105)** [2] la formule suivante, qui comporte une faible modification relative à l'influence des variations de pression :

$$I = I_n [1 - 0,0055 (x - 8,8) + 0,00015 (H - 760) + 0,0000019 (H - 760)^2].$$

Il ne faut pas oublier d'ailleurs que ces formules ne traduisent les résultats expérimentaux qu'avec une approximation de l'ordre du centième **(103)**.

L'étalon Hefner n'assure donc pas la reproduction de l'unité photométrique avec toute l'exactitude désirable ; à ses avantages (construction relativement simple, faible encombrement, combustible bien déterminé chimiquement) s'opposent l'instabilité de sa flamme, sa faible intensité lumineuse [3] et sa couleur [4] (beaucoup plus rouge encore que celle des lampes Carcel), qui rendent son emploi très difficile pour des mesures précises.

Il a été autrefois très employé en Allemagne (et même un peu aux Etats-Unis) : de 1893 à 1905 la « Reichsanstalt » a étalonné plus de 1300 lampes Hefner. Mais de 1920 à 1926 inclus elle n'en a étalonné que 333 contre 1907 lampes à incandescence : ce sont ces dernières qui constituent aujourd'hui les étalons usuels, même dans les pays où la « bougie Hefner » est encore l'unité légale.

Il convient de signaler que des mesures faites il y a quelques années avaient conduit à attribuer à l'étalon Hefner une intensité (en bougies internationales) qui

---

(1) On mesure en général avec un psychromètre la tension de la vapeur d'eau h. D'où

$$x = \frac{1000\,h}{H - h}.$$

(2) D'autres résultats ont été indiqués par Boltzmann et Basch (10), par Rosa et Crittenden (143), etc.

(3) Pour que la distance de la lampe au photomètre soit mesurable avec une faible erreur relative, elle doit être de l'ordre du mètre ; l'éclairement de l'écran est alors inférieur à 1 lux.

(4) La répartition spectrale de l'énergie dans le rayonnement de la lampe Hefner a été étudiée par divers physiciens (3, 22, 99, 144, 159). Elle correspond à une « température de couleur » d'environ 1875°K.

varierait avec le choix de l'étalon de comparaison conformément au tableau suivant [C.I.E. (1928) p. 18 et 1168] :

Etalons	Température de couleur	Intensité de la lampe Hefner en bougies (à ± 1 0/0 près)
—	—	—
Lampe à filament de carbone.	2000°K.	0,90
Lampe à filament de tungstène dans le vide.	2360°K.	0,875
Lampe à atmosphère gazeuse.	2600°K.	0,855

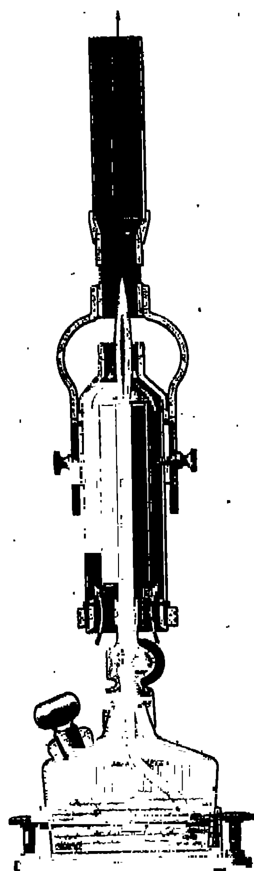


Fig. 7 *a*.

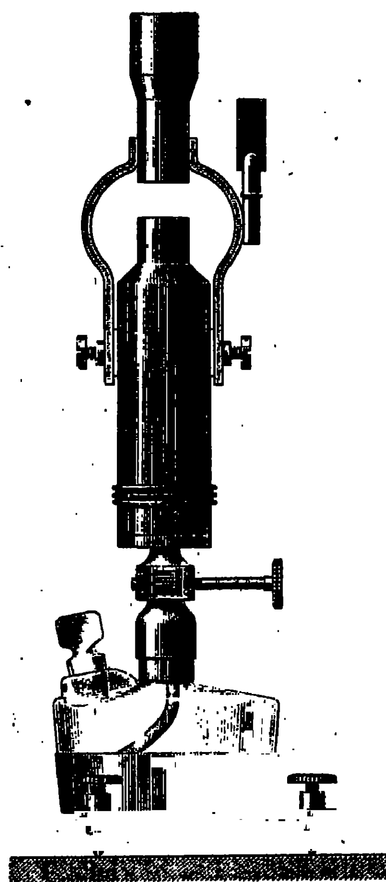


Fig. 7 *b*

Lampe Vernon-Harcourt à mèche.

Mais ces résultats sont en désaccord avec d'autres obtenus plus récemment **(87 *bis*)** [1]. Indépendamment des incertitudes que présente encore l'étalonnage des lampes à filament de tungstène dans le vide et surtout celui des lampes à atmo-

[1] Communication du Laboratoire central d'Electricité au Comité consultatif d'Electricité du Comité international des Poids et Mesures, session de 1930 (Rapport de ce Comité, page 174).

sphère gazeuse (Voir page 47); ces variations semblent pouvoir s'expliquer par l'intervention du phénomène de Purkinje qui doit fausser les mesures sur la lampe Hefner, à cause de sa couleur rougeâtre et de sa faible intensité lumineuse **(72)**.

4. — Les étalons Vernon-Harcourt. — En 1887, Vernon-Harcourt a proposé un modèle « industriel » de lampe étalon **(162)** (souvent appelée lampe de Woodhouse et Rawson, du nom des constructeurs). Le combustible employé était un carbure d'hydrogène liquide, le pentane C^5H^{12}, extrait du pétrole par distillation. Il était contenu dans un réservoir inférieur (figure 7) et montait à la lampe par une mèche, comme dans l'étalon Hefner; toutefois le tube porte-mèche, entouré d'un manchon métallique, était assez chaud pour que la vaporisation du pentane se produisît à plusieurs centimètres au-dessous de la flamme; la mèche restait par suite très éloignée de celle-ci.



Fig. 8.

Comme dans l'étalon Methven (voir ci-dessous), on n'utilisait qu'une partie seulement de la flamme : le haut et le bas étaient masqués par deux tubes de tôle formant cheminée. La hauteur totale de la flamme devait encore être maintenue constante, mais ses variations avaient relativement peu d'importance. L'intensité de cet étalon était de 1 bougie (anglaise); l'influence de l'état hygrométrique de l'air était, d'après Liebenthal **(103)**, sensiblement la même et celle de la pression atmosphérique 4 fois plus forte que pour la lampe Hefner.

Nous n'insisterons pas sur cet « étalon industriel », qu'on a cessé d'employer depuis longtemps. L'étalon Vernon-Harcourt « de laboratoire » brûle un mélange d'air et de vapeur de pentane. Dans le modèle primitif (proposé dès 1877) **(160)**, cet air carburé était préparé à l'avance (50 cm³ de pentane pour 28,3 litres d'air) et emmagasiné dans un gazomètre. Le brûleur était un simple cylindre de laiton percé d'un trou en son sommet (fig. 8) et entouré d'une cheminée de verre. L'intensité était de 1 bougie pour une hauteur de flamme de 63 mm. 5.

Dans les modèles ultérieurs l'air carburé **(161)** était préparé dans la lampe elle-même, et la flamme était en partie masquée par une cheminée de tôle. La figure 9 représente le modèle définitif, qui date de 1898 **(163)** et a été adopté par le *National Physical Laboratory* où il a été étudié par Paterson **(126)**. Ses conditions d'emploi ont aussi été précisées par Grafton **(66)**, Dow **(37)**, par le *Metropolitan Gas Referee* **(60)** et plus récemment par Crittenden et Taylor **(29)**.

L'appareil, entièrement noirci, comporte un brûleur annulaire B en stéatite, avec courant d'air intérieur et extérieur; l'air qui arrive au centre du brûleur s'est réchauffé au préalable par passage dans le manchon M entourant la cheminée C, qui assure le tirage. Le tuyau T amène dans la partie annulaire du brûleur de l'air qui s'est carburé dans le réservoir R par contact avec du pentane

liquide. La flamme est entourée (sauf du côté du photomètre) par un tronc de cône métallique K ; sa partie supérieure est masquée par le bas de la cheminée C : la hauteur de flamme utilisée est ainsi limitée à 47 mm. Mais une fenêtre de mica (placée du côté opposé au photomètre) permet de voir la pointe de la flamme, que l'on doit amener à une position repérée, en agissant sur les robinets r et r'.

Dans des conditions atmosphériques dites « normales » (pression : 760 mm ;

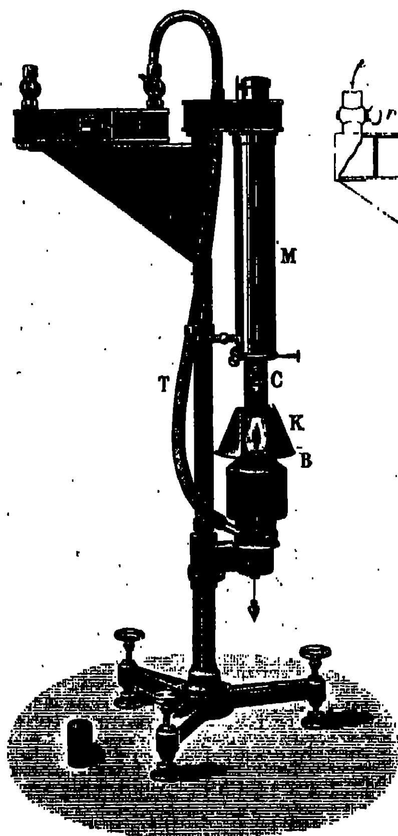


Fig. 9 *a*.

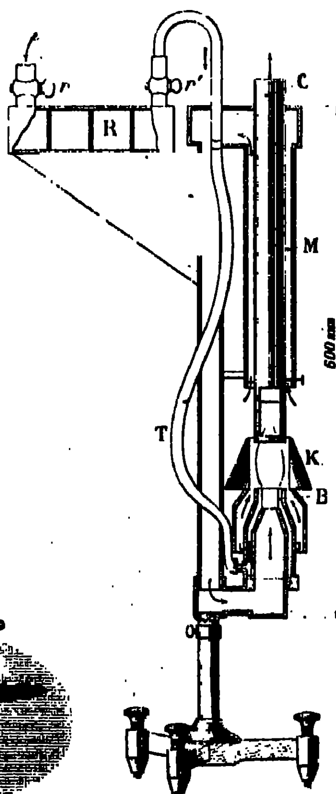


Fig. 9 *b*.

Etalon Vernon-Harcourt, modèle actuel.

humidité : 8 litres [1] de vapeur d'eau par mètre cube d'air sec), l'intensité de cet étalon est, en principe, de 10 bougies anglaises. (Rappelons que la bougie internationale est égale à l'ancienne bougie anglaise, ainsi qu'à notre bougie décimale).

[1] Le degré d'humité « normal » était autrefois fixé à 10 litres de vapeur d'eau par mètre cube. On l'a ramené à 8 litres en 1908 (64), pour corriger une erreur faite sur les mesures hygrométriques antérieures, tout en maintenant la « bougie anglaise » égale à la « bougie décimale »

Sa température de couleur est d'environ 1920° K, un peu supérieure à celle de la lampe Hefner, mais encore très inférieure à celle des lampes à filament incandescent.

Pour les mesures photométriques, on compte les distances à partir du centre de l'anneau de stéatite ; comme la flamme n'est pas ponctuelle, on doit, si on recherche une grande précision, placer toujours l'écran photométrique à la même distance, soit 1 mètre.

La lampe ne prend son état de régime qu'un certain temps après l'allumage ; son intensité, d'abord un peu trop faible, augmente rapidement, et passe au bout d'environ 10 minutes par un maximum, supérieur de 2 à 3 0/0 à sa valeur normale. Celle-ci n'est atteinte qu'au bout de 15,20 ou même 30 minutes, suivant la lampe **(29, 143)**.

Les principaux facteurs qui peuvent affecter l'intensité de régime sont les suivants :

a) *Détails de construction de la lampe.* — D'après Rosa et Crittenden **(143)**, ils ne sont pas fixés avec une suffisante précision : deux lampes du même constructeur, alimentées avec le même combustible, dans la même atmosphère, peuvent avoir des intensités lumineuses différant de 2 0/0 (quelquefois 4 0/0), sans doute parce que la moindre variation dans les dimensions du brûleur modifie sensiblement la forme et la température des courants gazeux autour de la flamme.

Des différences systématiques semblent exister entre les lampes anglaises et les lampes construites aux Etats-Unis d'Amérique. C'est donc une lampe Vernon-Harcourt *déterminée* qui a servi d'étalon primaire au « National Physical Laboratory » avant l'adoption de la bougie internationale et des étalons à incandescence qui en assurent la conservation ; les autres lampes devaient toujours lui être comparées (directement ou indirectement) avant leur mise en service.

b) *Combustible.* — Le pentane est un liquide transparent, mobile, très volatil et inflammable (aussi ne faut-il jamais approcher une flamme d'un bain de pentane). On l'obtient par distillation fractionnée de l'essence de pétrole ; sa densité à 15° est 0,625. Il doit distiller complètement entre 25 et 40°C : ce large intervalle de température indique que le liquide employé est en réalité un mélange ; il contient en effet d'autres carbures saturés (tétrane et hexane). Les proportions relatives de ses constituants étant susceptibles de varier notablement par évaporation, il faut non seulement vérifier ses propriétés physiques et chimiques **(29, 60)** au moment de l'achat, mais encore le conserver au frais, dans un bidon bien bouché, et ne le mettre dans le réservoir de la lampe qu'au moment de l'emploi. Le pentane qui reste dans le réservoir à la fin d'une expérience ne doit pas être employé pour des mesures ultérieures — ou bien il faut mesurer à nouveau sa densité : l'intensité de la lampe augmente avec celle-ci, dans une proportion qu'ont indiquée Crittenden et Taylor **(29)**.

Malgré ces précautions, la constance du combustible est assurément moins bien assurée que pour l'étalon Hefner.

c) *La hauteur totale de la flamme* est en revanche plus facile à régler (quoique il y ait souvent plusieurs pointes) — et surtout son influence est moindre que dans la lampe Hefner, à cause de l'emploi d'un écran : pour une variation de hauteur de 1mm, l'intensité lumineuse ne varie que de 0,4 0/0 d'après Liebenthal **(103)**, moins encore d'après Paterson **(126)** et Crittenden **(29)**.

d) L'influence des *conditions atmosphériques* a fait l'objet de nombreuses recherches **(29, 64, 126, 128, 143, 144, 145, 151)**. Dans une salle bien ventilée (pour que les proportions d'oxygène et de gaz carbonique soient constantes), l'intensité est, d'après Paterson et Dudding **(128)** (National Physical Laboratory) :

$$I = I_n[1 - 0{,}0063(x - 8) + 0{,}00085(H - 760)],$$

x étant le nombre de litres de vapeur d'eau par mètre cube d'air sec, H la pression atmosphérique (en mm de mercure) et I_n l'intensité « normale ».

Cette formule confirmée par Takatsu et Tanaka **(151)** en ce qui concerne l'action de l'humidité diffère sensiblement de celle trouvée au Bureau of Standards par Rosa et Crittenden **(143)** :

$$I = I_n[1 - 0{,}0057(x - 8) + 0{,}008(H - 760)].$$

La température ambiante peut influencer la lampe autrement qu'en modifiant l'état hygrométrique de l'air. Rosa, Crittenden et Taylor ont, en 1921 **(145)**, étudié séparément l'action de ces deux facteurs, et ont proposé la formule :

$$I = I_n[1 - 0{,}0052(x - 8) - 0{,}001(t - 15) + 0{,}00085(H - 760)],$$

dans laquelle t est la température (en degrés centigrades).

L'influence des variations de pression atmosphérique (presque 1 0/0 par cm) est beaucoup plus grande, celle de l'état hygrométrique légèrement plus grande que pour l'étalon Hefner. A La Nouvelle Orléans, certains jours d'été, x s'élève jusqu'à 28 litres **(29)**, d'où une correction de 11,4 ou 12,6 0/0 suivant qu'on adopte l'une ou l'autre des deux premières formules ci-dessus.

Les lampes Vernon-Harcourt étaient encore utilisées parfois comme étalons secondaires, il y a quelques années, en Angleterre et aux Etats-Unis. Le « Bureau of Standards » en a étalonné 85 entre janvier 1908 et juin 1913, par comparaison avec son étalon primaire à incandescence. Mais, même en s'appliquant à tenir compte des diverses influences perturbatrices, on obtient difficilement avec ces lampes des résultats plus précis qu'avec les lampes Hefner ; nous reviendrons plus loin sur les avantages et inconvénients comparés de ces deux étalons.

5. Autres étalons à flamme. — Etalons à l'acétylène. — Bien d'autres étalons à flamme ont fait l'objet d'essais plus ou moins poussés ; la plupart employaient des combustibles liquides : pétrole, huile de paraffine [Keates **(89)**],

benzine [Eitner **(41)** ; Uppenborn **(158)**], naphtaline [Broca **(15)**], mélanges de benzine et d'éther [Comité hollandais de photométrie] [1] ou de benzine et d'alcool éthylique [Blondel **(8)**]. Ils sont abandonnés depuis longtemps.

Les *étalons au gaz d'éclairage* de Giroud **(63)** et de Methven **(117)** ont rendu des services comme « sources-tares » pour la photométrie du gaz. Le premier était un simple bec-bougie à un seul trou, muni d'un dispositif (rhéomètre) réglant automatiquement la pression du gaz. Les variations de hauteur de la flamme étaient mesurées, et on en déduisait les variations de l'intensité lumineuse (qui était de l'ordre de 1 bougie). Un bec Argand alimenté en parallèle avec l'étalon précédent, et réglé de telle façon que son intensité soit constamment 10 ou 50 fois plus grande, servait à la photométrie des sources intenses. Malheureusement cet étalon variait notablement avec la composition du gaz employé **(158)**.

Methven pensa que les variations de la brillance de la flamme devaient être moindres que celles de son intensité totale, et que d'autre part on aurait plus de constance en utilisant du gaz d'éclairage mélangé à des vapeurs de gazoline (essence de pétrole). Il alimenta donc avec du gaz ainsi carburé un bec Argand en avant duquel était placé un écran noir percé d'une ouverture de surface déterminée. Ce dispositif n'a pas donné de meilleurs résultats que le précédent; mais il a pu suggérer à Vernon-Harcourt certaines des idées mises en œuvre dans sa dernière lampe au pentane.

On pouvait d'ailleurs remédier aux défauts des étalons Giroud ou Methven par l'emploi d'un gaz *pur* sous pression constante. Blondel **(7)** a proposé l'éthylène, mais il ne semble pas que ce gaz ait été effectivement employé. Au contraire, les flammes d'*acétylène* ont fait l'objet d'assez nombreuses recherches, et servent encore en radiométrie et en sensitométrie photographique. Leur couleur est assez voisine de celle des lampes à filament de tungstène dans le vide, donc plus favorable aux mesures photométriques précises que celle des autres étalons à flamme [2].

Le premier étalon de ce type fut construit par Violle en 1896 **(165)** ; il était constitué par un bec papillon, où deux jets de gaz, s'écrasant l'un contre l'autre, produisaient une flamme plate; celle-ci était utilisée soit en totalité, soit en partie (par interposition d'un diaphragme). Le bec employé, compliqué et difficile à définir avec précision, ne pouvait donner des résultats bien constants.

Féry **(48)** a montré qu'il valait mieux allumer l'acétylène à l'extrémité d'un tube capillaire, en verre ou en stéatite (mauvais conducteur de la chaleur, pour retarder l'encrassement). Il a étudié l'influence du diamètre de tube et de la hauteur de

---

[1] J. G. W. *37* (1894) 613.
[2] *Coblentz* (23) puis *Hyde, Forsythe et Cady* (75) ont déterminé la courbe de répartition spectrale d'énergie dans le rayonnement de la flamme d'acétylène. Sa température de couleur, qui est voisine de 2360°K, n'est pas la même en tous les points de la flamme et varie sensiblement avec le débit, comme l'ont montré Baillaud et Jouaust (5 *bis*). L'emploi de cet étalon pour des mesures de spectrophotométrie ou de sensitométrie ne peut donc assurer qu'une médiocre précision.

flamme sur l'intensité lumineuse, ainsi que la brillance des diverses régions de la flamme **(49)**. Pour isoler avec soin une portion convenable de celle-ci, il en formait, à l'aide d'une lentille (dans la direction du photomètre), une image réelle, dans le plan d'un écran opaque percé d'un trou. Ainsi, le flux lumineux transmis restait, d'après Féry, constant à (1/20/0 près) quand la hauteur de flamme variait entre 22 et 28 mm; le tube capillaire ayant un diamètre d'environ 0 mm,5 et un débit de 7 litres à l'heure, la surface de flamme utilisée avait une intensité de 0,25 carcel environ. Mais l'influence de l'état hygrométrique de l'air sur cet étalon n'a pas été suffisamment étudiée, non plus que celle des impuretés de l'acétylène employé.

L'étalon Fouché **(59)** utilise la flamme entière d'un bec à acétylène à jet unique réglé pour un débit constant et dont les caractéristiques sont les suivantes :

Bec en stéatite, dessus plat ; diamètre extérieur : 10 mm ; fond intérieur plat ; épaisseur de la toile (c'est ainsi qu'on appelle la paroi supérieure) : 2 mm; diamètre intérieur : environ 4,5 mm. Orifice permettant un débit de 8 à 10 litres par heure sous une pression de 100 mm de mercure.

M. Baillaud s'est livré à des recherches suivies sur l'étalon Fouché **(5)**, principalement en vue de son application à la sensitométrie des plaques photographiques. Il a trouvé que l'intensité lumineuse, pour un bec donné, est fonction linéaire du débit ; des becs de types différents, réglés pour un même débit, ne donnent pas des flammes de même intensité, mais des becs d'un même type, quoique non absolument identiques, donnent des résultats voisins (à 1/50 près). Les becs Bray, que l'on trouve dans le commerce, se rapprochent suffisamment du type décrit par Fouché.

Il est commode d'utiliser une bouteille d'acétylène dissous dans l'acétone, munie d'un manomètre détendeur et d'un robinet à pointeau ; le gaz est purifié par barbotage à travers une solution de bisulfite de soude, mais cette purification est peut-être insuffisante. Pour régler le débit, M. Baillaud mesure (à l'aide d'un manomètre différentiel à eau) la différence de pression entre deux points de la canalisation, séparés par un tube capillaire de 0,75 mm de diamètre et 25 cm de longueur. Un manomètre à air libre, indiquant la pression de l'acétylène sur l'orifice du bec, sert à vérifier (par la constance de la pression pour un débit donné) que le bec ne s'encrasse pas.

M. Baillaud employait des becs ayant, pour un débit de 5 litres, une intensité de 4,6 bougies environ. Il a étudié l'influence de la pression atmosphérique et de l'état hygrométrique de l'air sur l'intensité et trouvé qu'on pouvait tenir compte de cette influence en modifiant convenablement le débit d'acétylène. Mais ses résultats ont été obtenus par une méthode photographique ; il y aurait lieu de reprendre ces expériences si l'on voulait appliquer l'étalon Fouché à la photométrie visuelle, où il pourrait sans doute rendre des services (comme étalon secondaire assez grossier), grâce à sa simplicité d'emploi.

L'étalon à acétylène Eastman-Kodak (fig. 10) **(85)**, employé au Etats-Unis d'Amé-

rique quand on ne peut disposer d'un étalon électrique), est assez analogue au précédent : il comporte un bec Bray à entraînement d'air alimenté sous une pression de 9 cm d'eau ; la flamme, de 3 mm de diamètre et 50 mm de hauteur, est entourée d'une cheminée de métal noirci, percée d'un trou, de telle façon qu'on utilise la région qui est le moins influencée par de petites variations de pression du gaz. Chaque lampe de ce modèle est étalonnée par comparaison indirecte avec l'étalon primaire. Il est difficile de dire, à l'heure actuelle, si cet étalon est supérieur ou inférieur à celui de Fouché. On a aussi cherché [Baillaud [1], Sharp **(147)**] à s'affranchir de l'influence des conditions atmosphériques en faisant brûler l'acétylène dans une atmosphère d'oxygène : si ces essais donnaient de bons résultats, l'étalon à acétylène deviendrait particulièrement intéressant.

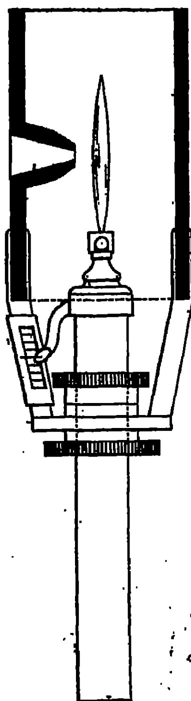


Fig. 10.
Etalon Eastman-Kodak.

6. Comparaison des principaux étalons à flamme. — Comme nous l'avons rappelé au chapitre I, les trois principaux étalons à flamme ont été comparés à maintes reprises, principalement par Laporte, Perot, Janet et Jouaust en France **(84, 96, 97, 98, 129, 130)**, par Paterson en Angleterre **(126)**, Liebenthal en Allemagne **(104)**, Hyde **(73)**, puis Rosa et Crittenden **(143)** aux Etats-Unis d'Amérique [2].

Ces comparaisons montrèrent l'égalité approximative de la bougie décimale française (définie à l'aide de la lampe Carcel) et de la bougie anglaise (1/10 de l'intensité normale de l'étalon Vernon-Harcourt), l'unité Hefner étant inférieure de 1/10 aux précédentes.

Elles mirent en évidence les avantages et inconvénients respectifs des trois étalons : la lampe Hefner est moins coûteuse et moins encombrante que les deux autres, le combustible qu'elle emploie est sans danger, et surtout peut être obtenu très pur ; mais la lampe Vernon-Harcourt est beaucoup plus stable, et se prête par suite à des mesures plus rapides [3]. D'autre part la lampe Hefner exige un observateur supplémentaire pour surveiller la hauteur de flamme; sa faible intensité, sa couleur plus rouge que celle des deux autres étalons sont très gênantes pour des mesures précises.

---

(1) D'après une communication récente au Comité Français de l'Eclairage (Octobre 1930), MM. Baillaud et Seferian utilisent un étalon oxy-acétylénique très peu sensible aux variations atmosphériques. Sa température de couleur serait 3 180°K. (5 *ter*).

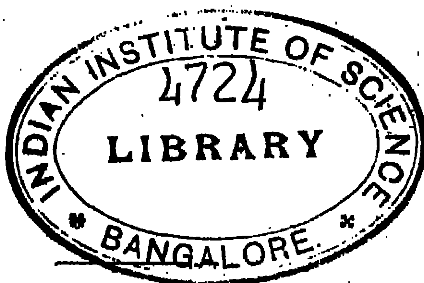
(2) Voir aussi les résultats présentés à la Commission Internationale de Photométrie en 1903, 1907 et 1911, reproduits par : *Rev. Gén. El., 26* (1929), 904.

(3) D'après *Rosa et Crittenden* (143), on peut faire 30 pointés en 5 minutes avec une lampe Vernon-Harcourt, et seulement 20 en 1 quart d'heure avec une lampe Hefner.

L'influence des circonstances atmosphériques nécessite pour tous les étalons à flamme des corrections délicates et parfois assez incertaines. Les résultats obtenus à l'aide d'une lampe déterminée sont, d'après Rosa et Crittenden, plus constants pour l'étalon Vernon-Harcourt (écart moyen par rapport à la moyenne : 0,4 0/0) que pour l'étalon Hefner (0,6 0/0) ; mais alors que les intensités moyennes de deux lampes Hefner quelconques diffèrent en général de moins de 2 0/0, celles de deux lampes Vernon-Harcourt quelconques peuvent différer de 4 0/0. Quant aux lampes Carcel, leur reproductibilité est encore bien moindre.

Ces incertitudes expliquent l'abandon des lampes à flamme pour la réalisation de l'étalon primaire ; tout au plus pourraient-elles servir à contrôler que les lampes à incandescence qui les ont remplacées pour cet usage ne subissent pas, pendant une longue période (50 ans, par exemple), une variation d'ensemble dépassant 2 0/0. Encore ce contrôle serait-il probablement assez incertain

Mais les lampes à flamme peuvent aujourd'hui encore servir d'étalons secondaires de précision moyenne, dans les laboratoires ne disposant pas de l'équipement électrique nécessaire pour l'emploi des lampes à incandescence, dans certaines usines à gaz, par exemple. Pour cet usage il semble que les lampes Vernon-Harcourt sont préférables aux lampes Hefner, mais qu'un étalon à acétylène soigneusement étudié pourrait donner des résultats encore meilleurs



CHAPITRE III

ÉTALONS CONSTITUÉS PAR DES LAMPES ÉLECTRIQUES A FILAMENT INCANDESCENT

I. Possibilité d'emploi des lampes électriques comme étalons. — Il y a bien longtemps qu'on a songé à remplacer les étalons à flamme par des corps incandescents chauffés électriquement. Quand un corps inaltérable est parcouru par un courant électrique constant, et placé dans des conditions de refroidissement bien déterminées, il prend une température de régime invariable; si cette température est assez élevée, le corps est porté à l'incandescence et son intensité lumineuse est constante.

Dès 1844, Draper **(39)** avait proposé d'utiliser ainsi comme étalon de lumière un fil ou une lame de platine traversés par un courant assez intense. Schwendler réalisa en 1879 **(146)** un dispositif de ce genre ; la lame de platine, en forme de fer à cheval, avait 2 mm de largeur, 36 mm, 28 de longueur, 0 mm,017 d'épaisseur; elle était prolongée par des lames plus larges servant de prises de courant. Sa température, et par suite son intensité lumineuse, variaient beaucoup sous l'influence des courants d'air; aussi dut-on la placer sous une cloche en verre. Son intensité lumineuse était alors d'environ 1,5 bougies anglaises pour une intensité de courant de 6,15 ampères.

Schwendler insista sur la nécessité d'employer du platine pur; la présence de corps étrangers (même en faible proportion) fait en effet varier sensiblement la résistance électrique de la lame, et par suite sa température de régime, pour une intensité de courant constante; elle modifie d'autre part sa brillance à une température déterminée. Enfin, cette brillance semblait varier, pour une même lame, au cours des chauffages successifs, sans doute à cause d'une altération superficielle du platine. Nous reviendrons au chapitre IV sur d'autres essais infructueux faits en 1894 par Lummer et Kurlbaum avec une lame de platine incandescente. Ce métal a d'ailleurs jusqu'à son point de fusion (qui est inférieur à 2050° K) un rayonnement lumineux beaucoup trop rouge pour qu'on puisse aujourd'hui l'employer comme étalon photométrique.

Aussi a-t-on fait appel à des corps plus réfractaires (carbone ou tungstène, dans le vide ou dans un gaz inerte). Il est malheureusement difficile de les obtenir parfaitement purs, et aussi d'en faire des fils ou des lames parfaitement homogènes; on ne peut d'ailleurs régler les dimensions de ces fils ou de ces lames avec la précision extrême nécessaire pour que, quand on y fait passer un courant électrique déterminé, leur intensité lumineuse prenne par là même une valeur fixée à

l'avance à 1/100 près, par exemple. Autrement dit, il semble bien difficile (1) de réaliser ainsi un étalon primaire de première espèce (au sens indiqué page 6). Au contraire, on a pu à l'aide de filaments chauffés électriquement, fabriquer d'excellents étalons lumineux secondaires et même constituer, comme nous le verrons plus loin, l'étalon primaire (de deuxième espèce) qui sert actuellement à définir la bougie.

On s'est servi, pour cet usage, de lampes électriques à incandescence peu différentes de celles qu'on trouve couramment dans le commerce. Presque dès l'apparition des lampes à filament de carbone on avait songé, en effet **(11, 52, 96, 103, 108, 127, 134)**, à les utiliser en photométrie comme *lampes tares* destinées à être comparées successivement à un étalon, puis aux diverses sources étudiées : il fallait pour cela que leur intensité lumineuse fût suffisamment constante, pendant toute la durée d'un groupe de mesures.

L'expérience montra que, pendant les premières dizaines d'heures d'allumage, la résistance électrique de ces lampes est très variable ; elle diminue le plus souvent d'une fraction notable, sans doute par suite d'un complément de cuisson du filament, dont les particules se soudent plus intimement. Si, pendant cette période, on les alimente à tension constante, la puissance consommée et l'intensité lumineuse augmentent en fonction du temps. Et même si on s'attache à maintenir constante la puissance, l'intensité lumineuse est encore variable. Puis la résistance électrique se stabilise, pendant une période plus ou moins longue. Elle augmente de nouveau lorsque la lampe a beaucoup servi, par suite de l'usure du filament; il devient alors impossible d'alimenter la lampe à régime constant. En même temps, le carbone volatilisé recouvre l'ampoule, qui devient de plus en plus absorbante.

Si on a soin de ne pas survolter les lampes, cette usure ne se produit pas rapidement et on peut obtenir d'elles une intensité lumineuse remarquablement constante (à quelques millièmes près) pendant une longue période de leur vie, pouvant atteindre plusieurs dizaines d'heures. Il suffit pour cela de maintenir constante à 1/10000 près la différence de potentiel aux bornes. (Quand la tension varie de 1 0/0, l'intensité lumineuse varie de 6 0/0 environ). La couleur de ces sources est plus blanche que celle des étalons à flamme; leur emploi est extrêmement simple et n'exige aucune correction relative à l'état de l'atmosphère.

Quant aux lampes à filament de tungstène, elles n'ont pas supplanté celles à filament de carbone pour la conservation de l'unité d'intensité lumineuse, parce que leur constance a semblé un peu moins bien assurée. Mais leur couleur est encore plus favorable pour la plupart des mesures de photométrie pratique; aussi fournissent-elles d'excellents étalons secondaires.

---

(1) Des recherches sont cependant actuellement poursuivies dans cette voie (Communication de M. Zwikker au Congrès International de l'Eclairage, septembre 1931).

L'emploi des lampes électriques comme sources à rayonnement constant n'est d'ailleurs pas limité à la seule photométrie visuelle. Elles peuvent servir d'*étalons secondaires de distribution spectrale d'énergie*, au moins dans la région visible du spectre : il suffit pour cela qu'on ait déterminé leur température de couleur (sous un régime électrique donné) par comparaison avec un corps noir **(17, 57, 58, 74, 115)**. Mais dans l'ultraviolet, le rayonnement émis est réduit d'une façon en général mal connue par l'absorption de l'ampoule [1] ; dans l'infrarouge, l'émission des filaments de tungstène est d'autre part moindre que celle d'un corps noir porté à leur température de couleur **(58)**. Les filaments de carbone semblent avoir au contraire un pouvoir émissif peu inférieur à l'unité dans un assez large domaine spectral **(57)**.

Pour la *sensitométrie des plaques photométriques*, les lampes à filament de tungstène semblent devoir fournir (dès qu'on aura étudié avec plus de précision leur rayonnement dans le début de l'ultraviolet) des étalons très supérieurs aux flammes d'acétylène **(45, 87)**. On s'occupe actuellement de fixer le choix d'écrans colorés qu'on associera à des lampes ayant une température de couleur de 2 360°K (facteur d'efficacité : 8,2 lumens par watt) pour obtenir un rayonnement comparable, au point de vue de son action photographique, à celui du jour (ou plus exactement d'un corps noir à 5 000°K) [Congrès Photog. (1928), 173 ; *Sc. et Ind. Photog*. 9A (1929), 128 et 2e Sie, 1 (1930), 37].

Enfin des lampes à filament ou mieux à ruban de tungstène, sous un régime bien déterminé, servent couramment d'*étalons secondaires en pyrométrie optique* : on détermine, par comparaison avec un corps noir, la température de brillance d'une certaine région du filament, la lampe sert ensuite à l'étalonnage ou au contrôle des pyromètres **(138, 139)**.

N'insistons pas sur ces applications, qui ont été étudiées en détail dans un autre volume de cette Encyclopédie [2], et revenons aux étalons spécialement destinés à la photométrie visuelle.

2. Caractéristiques de construction des lampes électriques étalons. — Les figures 11 et 12 représentent des lampes-étalons à filament de carbone ou de tungstène. On s'attache, en les construisant, à réaliser les conditions suivantes :

a) *Le filament* doit être aussi *homogène* que possible, et d'un diamètre bien constant, afin d'éviter des surchauffes locales qui produiraient une usure prématurée. Ses extrémités doivent être sondées aux fils qui traversent le culot; et, lorsque certains points reposent sur des supports, les contacts doivent être établis de façon que les conditions de refroidissement du filament soient toujours les

[1] Certaines radiations ultraviolettes (et infrarouges) peuvent être absorbées soit par le verre de l'ampoule, soit par des dépôts (transparents pour la lumière visible) dont cette ampoule se recouvre pendant la fabrication ou par suite de l'usure de la lampe.

[2] G. *Ribaud* : Traité de Pyrométrie optique. Editions de la *Revue d'optique*, 1931.

mêmes. Ces précautions sont d'autant plus nécessaires que l'intensité du courant dans la lampe est plus élevée ; aussi les lampes à tension normale (100 volts ou davantage) fournissent-elles en général de meilleurs étalons que les lampes à bas voltage.

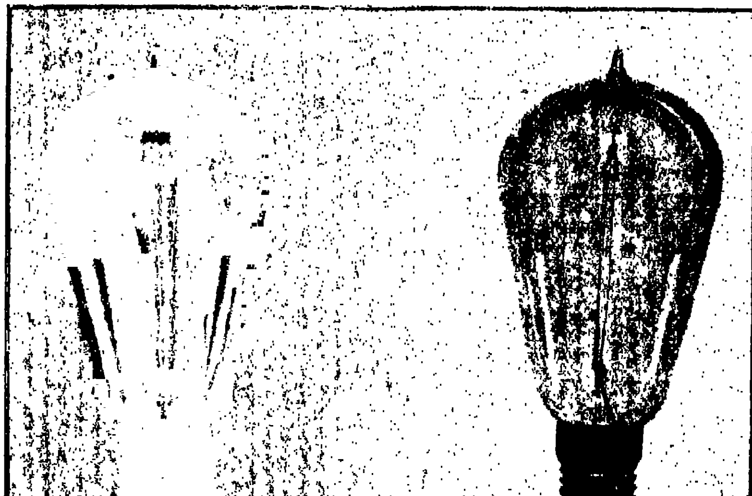


Fig. 11. — Etalon électrique à filament de carbone du Laboratoire Central d'Electricité.

b) Le filament est [1] fixé *dans un plan* qui contient l'axe géométrique de l'ampoule (ou qui tout au moins est parallèle à cet axe). Il est constitué, pour les lampes au carbone, par une ou deux boucles en forme d'épingle à cheveux (figure 11) ; pour les lampes au tungstène, par de nombreux brins disposés en dents de scie (on dit aussi en « harpe ») (figure 12).

Avant d'effectuer une mesure, on oriente le plan du filament perpendiculairement à l'axe du banc photométrique, ce qui est facile ; l'erreur due à une orientation imparfaite est d'ailleurs, d'après des expériences faites au Laboratoire Central d'Electricité sur des étalons à filament de carbone, inférieure à 1/1000 tant que l'angle avec la position normale reste plus petit que 5° ; elle n'atteint 5/1000 que pour un angle de 14° [2]. Au contraire, avec des lampes ordinaires

(1) Sauf pour les lampes servant d'étalons de flux lumineux ou d'intensité horizontale moyenne. Certaines des lampes constituant l'étalon primaire du Bureau of Standards appartiennent à ce dernier type : on effectue les mesures photométriques en les faisant tourner autour de leur axe vertical (30) à raison de 1 tour par seconde environ.

(2) D'après une communication récente de M. *Yamauti* au Congrès International de l'Eclairage (1931), les étalons au tungstène du type représenté par la figure 12 présenteraient parfois des

dont il est difficile de bien repérer l'orientation, il peut arriver qu'une rotation de 1 ou 2 degrés fasse varier de 10 0/0 l'intensité lumineuse.

Un autre avantage essentiel des lampes à filament plan est qu'on peut mesurer avec précision leur distance à l'écran photométrique, et effectuer les calculs comme s'il s'agissait d'une source ponctuelle. Nous avons vu en effet que, à ce point de vue, il importe assez peu que la source ait des dimensions transversales (c'est-à-dire perpendiculaires à l'axe du photomètre) atteignant plusieurs centimètres.



Fig. 12. — Etalon électrique à filament de tungstène du Laboratoire Central d'Electricité.

Pourtant, pour des mesures de précision, il est bon de s'attacher à placer la lampe étalon à une distance fixe du photomètre, celle qui produit un éclairement de 10 lux, par exemple.

c) Cette dernière façon de procéder est d'ailleurs toujours à recommander, pour la raison suivante : une partie notable (8 0/0 environ) du flux lumineux qui tombe sur l'écran photométrique provient du filament *indirectement*, après réflexion sur la face postérieure de l'ampoule [1]. Si l'ampoule est sphérique ou cylindrique, et si le filament est voisin de son axe, l'ampoule en donne une image réelle symétrique de l'objet par rapport au centre ou à l'axe. Dans le cas général, il n'y

variations d'intensité lumineuse dépassant 5/1000 pour une erreur d'orientation de quelques degrés : ces variations diminuent beaucoup si on donne à la tige de verre supportant le filament la forme d'un cadre rectangulaire.

[1] On peut en général ne pas tenir compte des rayons ayant subi plusieurs réflexions (156). La Chambre Centrale des Poids et Mesures de l'U.R.S.S. utilise des étalons à ampoule conique tels que la lumière réfléchie par le fond de l'ampoule ne puisse pas éclairer l'écran photométrique.

a pas d'image nette, et l'éclairement que la lumière ainsi réfléchie produit sur le photomètre varie avec la distance de l'ampoule suivant une loi très mal connue. Il est alors nécessaire de maintenir cette distance constante.

L'ampoule peut d'autre part dévier à la façon d'une lentille certains des rayons qui la traversent. Aussi convient-il, pour que la lampe puisse servir d'étalon, que l'épaisseur du verre soit assez uniforme, et qu'aucune partie du filament ne soit trop voisine de la paroi.

d) *L'ampoule* des lampes-étalons est par suite, en général, plus grosse que celle des lampes habituelles : pour les étalons du Laboratoire Central d'Electricité, elle a environ 12 cm de hauteur au-dessus du culot, et 7 cm de diamètre maximum. Ces grandes dimensions ont un autre avantage, qui est de retarder l'usure des lampes. Celle-ci, en effet, tient en partie à ce que, lorsqu'une lampe est allumée, la surface intérieure de l'ampoule se recouvre progressivement d'une couche absorbante due à une sorte de sublimation du filament : ce noircissement de l'ampoule est évidemment d'autant moindre que sa surface est plus grande.

D'autre part la face extérieure de l'ampoule doit naturellement être toujours maintenue très propre.

e) *Les fils* reliant la lampe à la source de courant sont souvent *soudés* aux paillettes du culot. Cette manière de faire est toujours à recommander pour les lampes à bas voltage. Mais l'expérience a montré que, quand l'intensité de courant est assez faible (ce qui est le cas pour les lampes fonctionnant sous 100 volts ou davantage), les douilles à vis, bien propres, assurent des contacts dont la résistance électrique est faible et bien constante. Il ne faut pas employer de douilles à baïonnette, leurs mauvais contacts risqueraient de faire varier le régime électrique de la lampe, et par suite son intensité lumineuse.

3. Formation et vie utile des lampes-étalons. — Les lampes-étalons sont, si on les compare aux lampes usuelles, notablement sous-voltées : leurs consommations spécifiques approximatives sont indiquées dans le tableau ci-contre :

TABLEAU IV. — CONSOMMATION SPÉCIFIQUE APPROXIMATIVE DE DIVERSES LAMPES

		Lumens par watt	Watts par bougie d'intensité horizontale moyenne
Lampes à filament de carbone	étalon	2,8	4,0
	usuelle	3,3	3,5
Lampes à filament de tungstène dans le vide	étalon	7	1,5
	usuelle	10	1,2

Leur température de couleur est environ 2080°K pour les étalons au carbone, et 2360°K pour les étalons au tungstène.

Aussi leur usure est-elle relativement très lente. Elles subissent toutefois, au début de leur « vie », des modifications importantes. Telles qu'elles sont livrées par le fabricant, elles sont encore impropres à servir d'étalon ; ce n'est qu'après avoir été allumées pendant plusieurs jours qu'elles ont, à tension constante, une résistance électrique et une intensité lumineuse suffisamment stables. Cette remarque s'applique à toutes les lampes à filament incandescent ; pour certaines d'entre elles, spécialement pour les lampes au tungstène préparées par le procédé dit « au getter », l'augmentation d'intensité lumineuse peut atteindre 25 0/0 au cours des premières heures d'allumage. Avant de les utiliser comme étalons, ou simplement comme sources-tares pour les mesures au banc photométrique (ou encore comme sources de comparaison dans un luxmètre), on doit donc faire subir à ces lampes une *formation*.

Voici comment on opère au Laboratoire Central d'Electricité. On mesure la résistance initiale des lampes et ses valeurs successives après 1, 2, 3 jours d'allumage, sous une tension voisine de leur tension d'utilisation (généralement 110 volts). Pour chaque période séparant deux mesures, on calcule la variation de résistance par heure d'allumage. Cette variation, d'abord rapide, devient très faible au bout d'environ 100 ou 150 heures ; quand elle est inférieure à 1/10 000 de la résistance de la lampe, on passe aux essais photométriques, qui sont naturellement effectués avec la plus grande précision possible (plusieurs observateurs exercés font chacun un assez grand nombre de mesures, 10 au moins, dont on prend la moyenne; l'erreur possible sur les mesures homochromes est alors en général inférieure à 1/200). On règle la tension pour que l'intensité lumineuse soit voisine d'un chiffre rond (10 ou 20 bougies), ou mieux, pour que la consommation spécifique ait la valeur voulue. A partir de ce moment, la tension de régime ainsi déterminée n'est plus jamais dépassée.

Sous cette tension on allume la lampe pendant 3 ou 4 périodes successives de 15 à 20 heures et on mesure après chaque période son intensité lumineuse. Si celle-ci n'a pas varié (dans les limites de précision des mesures), la lampe est conservée comme étalon. Au cas contraire, elle est rejetée (1). A titre de contrôle, on mesure chaque fois l'intensité du courant dans la lampe. Le tableau V indique, à titre d'exemples choisis entre plusieurs centaines, les résultats de ces mesures photométriques pour diverses lampes du Laboratoire Central d'Electricité (L.10 et L.26 sont deux bonnes lampes au carbone; L.30, au carbone aussi, a dû être rejetée; R.10 est un bon étalon secondaire au tungstène dans le vide).

---

(1) Au National Physical Laboratory, d'après *Walsh* (Photometry, p. 137), la formation dure environ 100 heures ; et on vérifie que, pendant les 50 dernières heures, la variation horaire d'intensité lumineuse est inférieure à 1 dix-millièmes.

TABLEAU V. — VARIATIONS DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE DE QUELQUES LAMPES-ÉTALONS EN FONCTION DU TEMPS D'ALLUMAGE

t. Temps d'allumage.
V. Tension aux bornes.
A. Intensité du courant.
I. Intensité lumineuse (à 1/200 près).

Lampe marquée	Date	t (heures)	V (volts)	A (ampères)	I (bougies)	Observations
L.10 (carbone)	Janvier 1913	140	107,3	0,7140	$20{,}0_6$	Contrôle de la formation
	—	155	—	0,7166	$20{,}1_4$	
	—	170	—	0,7166	$20{,}0_4$	
	Septembre 1925		—	0,716	20,2	Contrôle de la bonne conservation
	Mai 1926		—	0,716	$20{,}4_5$	
	Octobre 1926		—	0,716	$20{,}1_5$	
L.26 (carbone)	9 Avril 1913	120	104,9	0,7028	$20{,}0_2$	
	10 —	140	—	0,7039	$19{,}9_7$	
	12 —	160	—	0,7060	$20{,}0_7$	
	13 —	180	—	0,7065	$20{,}2_5$	
	28 Juin 1913		—	0,7071	$20{,}3_2$	
	1 Déc. 1925		—	0,707	$20{,}1_0$	
	18 Oct. 1926		—	0,707	$20{,}1_5$	
L 30 (carbone)	9 Avril 1913	120	105,3	0,7060	$19{,}9_2$	Lampe inutilisable comme étalon
	10 —	140	—	0,7063	$19{,}7_8$	
	12 —	160	—	0,7064	$19{,}6_2$	
	15 —	180	—	0,7068	$19{,}1_5$	
	16 —	200	—	0,7038	$15{,}2_2$	
R.10 (tungstène dans le vide)	4 Déc. 1920	160	108,0	0,270	19,9	
	13 Janv. 1921	184	—	0,270	$19{,}9_2$	
	5 Févr. 1921	208	—	0,270	20,0	
	12 —		—	0,270	$19{,}9_7$	
	23 Avril 1921		—	0,270	$19{,}8_7$	

Après ces essais, le laboratoire d'étalonnage établit pour chaque lampe ayant donné satisfaction un bulletin indiquant sa tension normale de service et les valeurs correspondantes de l'intensité de courant et de l'intensité lumineuse. Ces indications sont reproduites sur les boîtes servant à conserver les lampes.

Un fois leur formation effectuée, les lampes constituant l'étalon *primaire* servent, nous l'avons dit, très rarement : un quart d'heure par an, par exemple. On les conserve entre temps à l'abri des chocs et des trépidations (¹). Mais, même lorsqu'on ne les utilise pas, elles peuvent se modifier, la pression du gaz resté dans l'ampoule et la constitution du filament étant susceptibles de varier progressivement. Aussi doit-on contrôler périodiquement l'intensité lumineuse de chacune d'elles par comparaison avec la moyenne des intensités de toutes les autres. Nous verrons plus loin (§ 5) comment on s'y prend pour effectuer ces comparaisons ; le résultat

(¹) La Chambre Centrale des Poids et Mesures de l' U. R. S. S. a établi pour l'emploi et la conservation de ses étalons de lumière un règlement particulièrement minutieux (156).

de certaines d'entre elles, concernant les lampes L.10 et L.26, a été reporté sur le tableau V.

Les étalons *secondaires*, préparés de la même façon que les étalons primaires, mais servant beaucoup plus souvent, s'usent par suite plus rapidement. Leur variation d'intensité lumineuse est généralement inférieure à 3 0/0 pendant les 100 premières heures d'allumage après formation. Il convient de les réétalonner après chaque période de 20 heures de travail, par exemple. On les remplace quand, par suite de l'usure du filament et du noircissement de l'ampoule, l'intensité lumineuse diminue notablement (en même temps qu'augmente la résistance électrique).

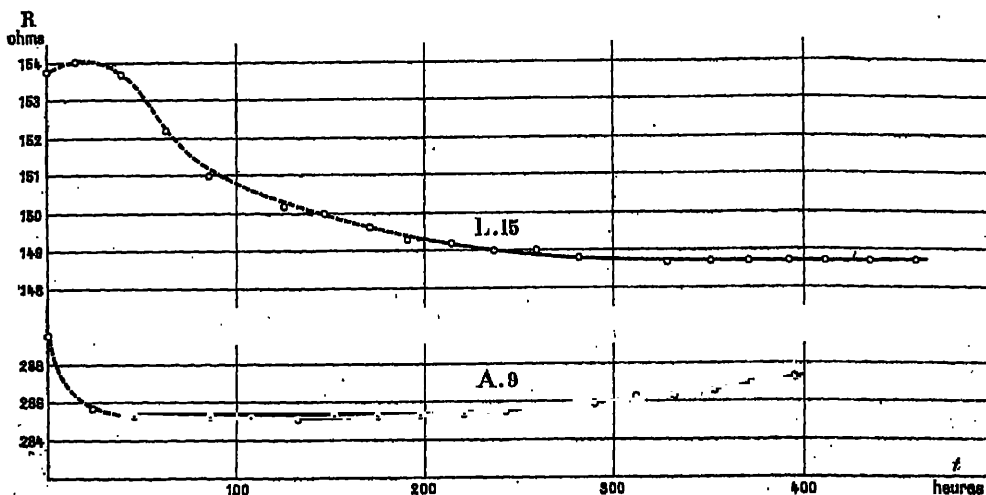


Fig. 13.

Comme les lampes sont sous-voltées, ce remplacement n'est, en général, nécessaire qu'après plusieurs centaines d'heures d'allumage.

Le tableau VI et les courbes de la figure 13 indiquent à titre d'exemple comment a varié en fonction du temps, pendant 400 heures d'allumage, la résistance électrique de deux lampes à filament de carbone du Laboratoire Central d'électricité. (La période de « formation » correspond à la partie ponctuée des courbes). La lampe L. 15 était remarquablement stable ; la lampe A. 9 présentait une cause d'usure relativement rapide (légère irrégularité du filament, ou température de fonctionnement un peu trop élevée).

Les lampes à filament de tungstène dans le vide, autrefois moins constantes que celles à filament de carbone, semblent à l'heure actuelle pouvoir fournir des étalons secondaires assez stables. Elles exigent de grandes précautions, à cause de la fragilité de leur filament. Quant aux lampes à atmosphère gazeuse, elles sont jusqu'ici peu stables, on ne les emploie guère que comme étalons de flux lumineux, de moyenne précision (Voir pages 51-52).

Tableau VI. — Variation de la résistance électrique de deux lampes-étalons en fonction du temps d'allumage

t, Temps d'allumage.
R, Résistance.
$\frac{\Delta R}{\Delta t}$, Variation horaire moyenne de la résistance.

Lampe L.15				Lampe A.9			
t (heures)	R (ohms)	$\frac{\Delta R}{\Delta t}$	Observations	t (heures)	R (ohms)	$\frac{\Delta R}{\Delta t}$	Observations
0	153,8			0	289,6		
15	154,0	+0,013		24	285,7	—0,15	Période de formation
39	153,7	—0,012		46	285,3	—0,018	
63	152,2	—0,062		86	285,3		
85	151,0	—0,054	Période de formation	108	285,2		
125	150,2	—0,020		132	285,1		
147	150,0	—0,009		152	285,3		
171	149,7	—0,012		175	285,3		
191	149,3	—0,020		198	285,3		
214	149,2	—0,004		221	285,4		
237	149,0	—0,009		243	285,5		
260	149,0			290	285,9		
282	148,8			312	286,3		
329	148,7			332	286,3		Usure prématurée
351	148,7			353	286,6		
371	148,7			372	287,0		
392	148,7			395	287,3		
411	148,7						
434	148,7						
459	148,7						

4. — Réglage électrique des lampes-étalons. — Les lampes-étalons, même soigneusement « formées » et non usées, n'ont une intensité lumineuse constante que si on maintient fixe la température de leur filament. Il suffit pour cela de maintenir constante soit la tension aux bornes, soit l'intensité du courant, soit la puissance, soit même la résistance électrique.

a) La source de courant utilisée doit être elle-même bien stable. Pour les mesures précises, il est indispensable d'employer une batterie d'accumulateurs, bien chargée, de capacité suffisante pour que sa force électromotrice ne diminue que très lentement au cours d'une série de mesures. Pour que la chute ohmique de tension dans les accumulateurs et dans la ligne soit, elle aussi, constante, il faut que la batterie soit, pendant les mesures photométriques, réservée exclusivement à l'alimentation de la ou des lampes servant aux essais.

Les réseaux d'éclairage subissent de fréquentes variations de tension qui les rendent absolument impropres à alimenter les lampes étalons. Il faut en outre éviter de remplacer, pour cet usage le courant continu par du courant alternatif,

qui se prête mal aux mesures précises, et qui, à tension efficace ou à puissance égale, ne donnerait sans doute pas la même intensité lumineuse [1].

En série avec la lampe étalon est disposé un rhéostat convenable : on le manœuvrera toujours de façon à *éviter de survolter la lampe.*

b) Quand la *tension* V aux bornes de la lampe varie de 1 0/0, l'intensité lumineuse varie d'environ 6 0/0 pour les étalons au carbone, — 4 0/0 pour les étalons au tungstène dans le vide.

Pour les mesures précises, il convient donc de régler V à 1/10 000 ou même 1/20 000 près, ce qui nécessite l'emploi d'un potentiomètre. Les laboratoires industriels peuvent à la rigueur se contenter d'un voltmètre *de haute précision* muni d'un miroir évitant, dans les lectures, les erreurs de parallaxe : si cet appareil

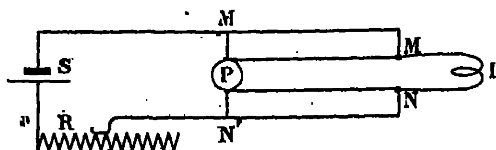


Fig. 14. — Réglage électrique d'une lampe étalon.
S, source de courant ; R, rhéostat ; L, lampe étalon ; P, potentiomètre ou voltmètre.

permet de mesurer la tension à 2/1 000 près [2], l'intensité lumineuse pourra être réglée à 1 0/0 près environ.

La tension de service d'un étalon est indiquée sur son certificat d'étalonnage; il s'agit toujours de la différence de potentiel entre les bornes de la lampe, sur son culot. Le potentiomètre ou le voltmètre doit donc être relié directement, comme l'indique la figure 14, à ces bornes (M et N). S'il était relié, par exemple, aux points M' et N' de la canalisation, la différence de potentiel mesurée serait trop grande, à cause de la chute de tension dans les conducteurs M M', N N', dont la longueur atteint souvent plusieurs mètres.

A chaque borne de la lampe arrivent donc deux conducteurs, reliés l'un à la source, l'autre au potentiomètre ou au voltmètre. Comme nous l'avons dit, ces conducteurs sont soudés aux paillettes du culot, ou simplement à la borne de la douille, quand la chute de tension dans les contacts entre douille et culot est négligeable (douilles à vis, tension supérieure à 100 volts).

Le voltmètre (ou éventuellement la boîte de réduction du potentiomètre) doit rester constamment en circuit au cours des mesures photométriques ; en effet, quand on le supprime, l'intensité du courant total diminue, donc aussi la chute de tension dans le rhéostat, et par suite la différence de potentiel aux bornes de la lampe augmente.

---

(1) Voir sur ce point une communication récente de M. Yamauti au Congrès International de l'Éclairage (1931).

(2) Les indications des voltmètres varient souvent notablement avec leur température : il est indispensable d'en tenir compte.

c) Le plus souvent, après avoir réglé la tension aux bornes d'une lampe étalon, on mesure *l'intensité* du courant qui la traverse : la constance de cette dernière est en effet un indice de constance pour l'intensité lumineuse. On utilise à cet effet un bon ampèremètre, ou mieux on mesure au potentiomètre la différence de potentiel aux bornes d'une résistance fixe de 1 ohm traversée par le courant total. Pour avoir l'intensité dans la lampe, il faut, bien entendu, retrancher du résultat brut l'intensité du courant dérivé passant dans le voltmètre ou dans la boîte de réduction.

d) On peut utiliser les lampes étalons un peu avant que leur résistance ait atteint son minimum et même après qu'elle a réaugmenté de façon sensible, à condition de les alimenter à *puissance constante* et non à tension constante **(142)**.

Mais cette méthode est d'une application difficile, les mesures directes de puissance étant beaucoup moins précises que les mesures de tension au potentiomètre.

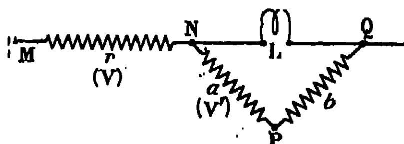


Fig. 15.

M. Fabry a employé autrefois l'artifice suivant **(42)** : trois résistances fixes $MN = r$, $NP = a$, $PQ = b$ sont disposées, par rapport à la lampe L, comme l'indique la figure 15. Supposons le courant dans NPQ négligeable vis-à-vis du courant I dans la lampe; soit E la tension aux bornes de L. La différence de potentiel entre M et N est $V = rI$. La différence de potentiel entre N et P est $V' = \frac{a}{a+b} E$. Si on règle la position du point P de telle façon que $V = V'$, puis qu'on maintienne constant $V + V'$, on aura

$$\frac{dV}{V} = -\frac{dV'}{V'}, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{dI}{I} + \frac{dE}{E} = 0.$$

La puissance EI dans la lampe L sera donc constante, même si sa résistance varie un peu.

e) Enfin pour éviter l'emploi d'appareils de mesure — voltmètre ou ampèremètre — susceptibles de se dérégler, on a proposé à diverses reprises de maintenir constante la température du filament incandescent (« formé » mais non usé) en maintenant constante sa *résistance* [1]. On peut pour cela le disposer sur l'une des branches d'un pont de Wheatstone dont les trois autres branches ont des résis-

[1] D'après *Forsythe* et *Worthing* (58), quand on fait varier de 1 % la tension aux bornes d'une lampe à filament de tungstène dans le vide, au voisinage du régime normal, l'intensité du courant varie de 0,6 %, la puissance consommée de 1,6 % et la résistance électrique de 0,4 %. Voir aussi *Langmuir* (95).

tances fixes, et dont la diagonale comporte un appareil de zéro (galvanoscope) sensible.

Ce dispositif a été appliqué en particulier par Ribaud **(138, 139)** à des lampes pyrométriques.

5. Réalisation de l'étalon photométrique primaire actuel. — Nous pouvons maintenant revenir avec quelque détail sur la détermination de l'étalon primaire actuel d'intensité lumineuse. Parmi les premières lampes à filament de carbone spécialement construites et « formées » pour servir d'étalons, celles qui ont semblé présenter les plus grandes garanties de stabilité ont été conservées par les laboratoires d'étalonnage. Avec la précision relativement faible que comportait l'emploi des anciens étalons à flamme, on a déterminé approximativement l'intensité lumineuse de ces lampes, que nous appellerons L_1, L_2, ... L_n. Mais les valeurs I_1, I_2, .. I_n, ainsi trouvées n'étaient pas compatibles entre elles au degré de précision qu'assurent les lampes à incandescence.

Pour déterminer des valeurs corrigées I'_1, I'_2, ... I_n, on a opéré ainsi : en comparant successivement à L_1, L_2, ... L_n une même lampe tare, on a été conduit à attribuer à son intensité lumineuse des valeurs légèrement différentes T_1, T_2, ... T_n. On a admis que la valeur véritable de cette intensité était la moyenne

$$T' = \frac{T_1 + T_2 + \cdots + T_n}{n}$$

et que par conséquent les valeurs véritables des intensités de L_1, L_2, ... L_n étaient

$$I'_1 = \frac{T'}{T_1} I_1, \qquad I'_2 = \frac{T'}{T_2} I_2, \quad \text{etc.}$$

On opère d'une manière analogue chaque fois qu'on veut déterminer l'intensité actuelle d'une quelconque des lampes dont l'ensemble constitue l'étalon, par comparaison avec toutes les autres. Le tableau VII donne un exemple des résultats qu'on peut ainsi obtenir ; il est relatif à des mesures effectuées en 1913 au Laboratoire Central d'Électricité, sur diverses lampes en service depuis plusieurs années.

La bonne conservation des lampes constituant l'étalon primaire tient, nous l'avons dit, à ce qu'elles servent très rarement. On les emploie uniquement pour tarer et contrôler périodiquement quelques étalons secondaires principaux, et ce sont ces derniers que l'on compare ensuite aux nombreux étalons secondaires livrés à l'industrie.

Les grands Laboratoires nationaux d'étalonnage ont précisé par la méthode que nous venons d'indiquer la définition de l'unité photométrique dans leurs pays respectifs. Mais des divergences subsistaient entre les diverses « bougies » ainsi déterminées **(30, 73)**. Le tableau VIII indique, par exemple, les résultats obtenus en photométrant un même groupe de lampes dans trois de ces laboratoires ; la différence de 1 1/2 0/0 existant en moyenne, d'après ce tableau, entre les résultats

TABLEAU VII. — DÉTERMINATION DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE DE CHACUNE DES LAMPES D'UN GROUPE PAR COMPARAISON AVEC TOUTES LES AUTRES

V. Tension aux bornes.
A. Intensité du courant.
I. Valeur primitivement admise pour l'intensité lumineuse.
T. Intensité attribuée à la lampe tare, en considérant le valeur I comme exacte,
T'. Moyenne des valeurs T.
I'. Valeur corrigée de l'intensité lumineuse de la lampe considérée $I' = \frac{T'I}{T}$.

Lampe n°	V (volts)	A (ampères)	I (bougies)	T (bougies)	I' (bougies)	$\frac{I'-I}{I}$ en %
801	106,1	0,8733	20,3	23,33	20,3	0
808	109,7	0,5781	16,0	23,22	16,07	+0,47
B. S. 52	49,5	1,3454	17,2	23,37	17,17	—0,17
941 m	107,4	0,1778	4,50	23,07	4,55	+1,12
941 f	106,5	0,6673	18,1	23,48	17,98	−0,64
50	115,0	0,5865	14,3	22,87	14,58	+1,98
8.801	105,0	0,4511	14,95	23,65	14,75	—1,37
α	105,0	0,2288	3,87	23,31	3,87	+0,08
δ	100,0	0,5146	17,4	23,40	17,36	− 0,30
σ	100,0	0,3190	7,92	23,22	7,96	+0,47
γ	100,0	0,5205	16,3	23,63	16,10	—1,30
A 2	105,7	0,3701	10,02	23,29	10,03	+0,17
A 13	105,3	0,3724	10,02	23,29	10,03	+0,17
L 3	109,6	0,7160	20,04	23,45	19,95	—0,51
L 18	106,3	0,7116	19,96	23,40	19,90	—0,30
Moyenne				T' = 23,33		

TABLEAU VIII. — RÉSULTAT DE MESURES PHOTOMÉTRIQUES EFFECTUÉES SUR LES MÊMES LAMPES AU LABORATOIRE CENTRAL D'ELECTRICITÉ (L. C. E.), AU NATIONAL PHYSICAL LABORATORY (N. P. L.) ET A LA PHYSIKALISCHE TECHNISCHE REICHSANSTALT (P. T. R.)

V Tension aux bornes.
A Intensité du courant.
I Intensité lumineuse.

Lampe marquée	V (volts)	L.C.E. A (ampères)	L.C.E. I (bougies)	N.P.L. A (ampères)	N.P.L. I (bougies)	P.T.R. A (ampères)	P.T.R. I (bougies) (1)
22 b	99,0	0,4785	32,2	0,4785	32,6	0,4785	32,7
c	99,5	0,4825	33,4	0,4835	$33,8^5$	0,4825	$33,9^7$
d	101,0	0,4845	34,3	0,484	$34,7^5$	0,4844	$34,8^2$
f	97,5	0,482	$31,9^5$	0,4825	$32,9^5$	0,4821	33,2
g	97,0	0,4825	$31,8^5$	0,483	32,0	0,4826	$32,8^5$
k	97,5	0,4785	$31,4^5$	0,478	$31,6^5$	0,4780	$31,7^5$
m	99,5	0,4845	$33,8^5$	0,4835	34,2	0,4841	$34,4^3$
n	99,0	0,476	32,5	0,4775	32,9	0,4766	$32,8^5$
o	100,0	0,480	$32,6^5$	0,4805	$33,3^5$	0,4799	33,3
p	99,5	0,4835	33,5	0,4825	$34,2^5$	0,4826	$34,3^7$
r	98,5	0,477	$31,4^5$	0,4765	$31,5^5$	0,4766	$31,7^2$
t	98,5	0,4835	33,1	0,483	$33,6^5$	0,4839	$33,8^5$
Moyenne.			$32,6^6$		$33,1^9$		$33,3^2$

(1) Mesures faites en bougies-hefner, et converties en bougies internationales, en admettant 1 hefner = 0,9 bougie internationale.

du Laboratoire Central d'Électricité et ceux du National Physical Laboratory est nettement supérieure aux erreurs possibles sur des mesures soignées. A la suite de nombreuses comparaisons de ce genre, un accord est intervenu en 1909 (84) entre le Laboratoire Central d'Électricité (de Paris), le National Physical Laboratory (de Teddington, Angleterre) et le Bureau of Standards (de Washington), qui ont légèrement modifié leurs étalons (1) de façon à avoir une unité commune, la bougie internationale. Les Comités Nationaux d'éclairage de la plupart des pays (2) ont depuis lors adopté cette unité (C. I. E. 1921, 1924 et 1928).

L'Allemagne, restée jusqu'ici en dehors de cet accord, continue à employer la « bougie Hefner » (inférieure de 10 0/0 à la bougie internationale).

Depuis cette époque, la conservation de l'unité est assurée, dans chacun des Laboratoires précités, par des comparaisons périodiques des lampes constituant l'étalon primaire (3); des échanges de lampes, effectués régulièrement entre ces trois Laboratoires, ont montré que l'accord entre leurs unités se maintient probablement à 1 0/0 au moins (4).

Une notable variation d'ensemble des lampes, tout en étant possible, semble assez improbable. L'emploi des lampes à filament de carbone a donc permis de réaliser un progrès très net dans la détermination de la bougie, et d'attendre sans trop d'impatience la réalisation d'un étalon primaire « de première espèce » dont la stabilité puisse être encore mieux garantie.

6. Étalonnage des étalons secondaires à filament incandescent (5). — La constance et la simplicité d'emploi des lampes à incandescence leur ont valu de supplanter presque entièrement les lampes à flamme pour la réalisation d'étalons secondaires. Ceux-ci sont préparés et vendus par les laboratoires chargés de la conservation de l'étalon primaire.

On doit prendre pour leur réglage électrique toutes les précautions indiquées au § 4 de ce chapitre. Comme nous l'avons signalé, il est prudent de les faire réétalonner après chaque période de 20 à 30 heures d'allumage. Le mieux est d'avoir plusieurs étalons secondaires, l'un d'eux n'étant allumé qu'exceptionnellement, pour contrôler les autres.

(1) L'unité employée antérieurement au Bureau of Standards fut réduite de 1,6 0/0 (30).

(2) États-Unis d'Amérique, France, Grande-Bretagne, Hollande, Italie, Japon, Suisse, U. R. S. S.

(3) Voir le tableau V. Des résultats relatifs aux contrôles successifs effectués en 1909, 1911, 1915 et 1920 sur les 45 lampes constituant l'étalon primaire au Bureau of Standards ont été publiés récemment par *Crittenden et Meyer* (30).

(4) Documents du Laboratoire Central d'Électricité; voir aussi référence (137) et C. I. E. (1928) 1165. D'après une communication de *J.-F. Meyer* au dernier Congrès international de l'Éclairage, les contrôles les plus récents (1930) ont semblé mettre en évidence une diminution d'intensité d'environ 1 0/0 pour les étalons au carbone conservés au Laboratoire Central d'Électricité, par rapport à ceux du Bureau of Standards et du National Physical Laboratory, — et une augmentation du même ordre de grandeur pour les étalons conservés à la Reichsanstalt.

(5) Pour cette opération, comme pour diverses autres mesures photométriques, on peut dans certains cas remplacer l'œil par une cellule photoélectrique, d'emploi plus commode et peut-être plus précis (48, 142), à condition toutefois que les sources que l'on compare aient exactement la même répartition spectrale d'énergie, pour toutes les longueurs d'onde auxquelles l'œil et la cellule sont sensibles. Si cette condition n'est pas remplie, il faut associer à la cellule un filtre coloré convenablement choisi.

a) *Les étalons secondaires au carbone* sont entièrement identiques aux étalons primaires. Suivant la précision des mesures auxquelles ils sont destinés, leur formation, leur étalonnage, leur réglage doivent être effectués avec plus ou moins de soin. Ces étalons au carbone sont d'ailleurs assez peu employés, parce qu'on n'utilise plus guère, pour l'éclairage, les lampes à filament de carbone.

b) Pour la photométrie des lampes à filament métallique dans le vide, il convient d'employer *des étalons secondaires à filament de tungstène* (figure 12) préparés et formés comme nous l'avons dit. Leur lumière est légèrement plus rouge que celle des lampes du commerce, parce qu'ils sont un peu sous-voltés ; mais la différence de couleur est trop faible pour gêner sensiblement les mesures. On élude donc ainsi, dans les laboratoires industriels, la difficulté des mesures hétérochromes.

Il nous reste à voir comment on opère, dans les laboratoires spéciaux, la comparaison des étalons secondaires au tungstène et des lampes au carbone beaucoup plus rouges qui constituent l'étalon primaire. Nous ne saurions discuter ici tous les délicats problèmes qui se présentent en photométrie hétérochrome. On les trouvera exposés dans les rapports présentés à la Commission Internationale de l'Eclairage, en 1921, 1924, 1928 et 1931 par M. Fabry (44) et en 1921 par M. Crittenden (27). Ils seront d'ailleurs étudiés en détail dans d'autres volumes de l'Encyclopédie Photométrique. Rappelons seulement qu'on hésite entre plusieurs méthodes principales pour juger de l'égalité de deux éclairements hétérochromes :

1° Le plus souvent on opère comme en photométrie homochrome (par exemple avec un photomètre Lummer et Brodhun), en essayant de faire abstraction de la différence de couleur des deux plages que l'on observe. Plus cette différence est grande, et plus augmente l'incertitude de chaque mesure ; on se fait une idée de cette incertitude d'après les écarts observés entre les résultats de mesures successives. Mais il peut arriver que ces écarts augmentent encore si l'observateur recommence la même mesure à plusieurs heures ou plusieurs jours d'intervalle. Les résultats varient d'autre part sensiblement avec les observateurs (même en éliminant ceux dont la vision des couleurs est anormale). Cette méthode directe est cependant celle qui a paru donner les meilleurs résultats au Laboratoire Central d'Electricité, à condition de prendre la moyenne de nombreuses mesures faites par un assez grand nombre d'observateurs bien exercés.

2° On peut encore procéder « par échelons » ou « pas à pas », c'est-à-dire employer des sources auxiliaires dont les couleurs sont intermédiaires entre celles des deux sources étudiées S et S' (¹) (128). Chacune de ces comparaisons est

(¹) Le National Physical Laboratory utilise à cet effet une série de lampes à incandescence au tungstène, au régime de 2,1 ; 3 ; 4 ; 5,5 et 7 lumens par watt.

presque homochrome si les sources sont assez nombreuses et bien choisies ; elle peut donc être faite avec précision. Mais les erreurs correspondant aux diverses mesures peuvent s'accumuler. Il ne semble donc pas prouvé que cette *méthode de cascade*, qui a été employée surtout en Angleterre, soit plus précise que la comparaison directe ([illegible]).

4° Enfin la méthode de scintillation, principalement utilisée aux États-Unis (flicker photometry), consiste à projeter alternativement, suivant un rythme constant et assez lent, sur une plage photométrique unique, les deux éclairements à comparer. Ceux-ci sont considérés comme égaux quand l'impression de scintillation (papillotement) disparaît.

Ce critérium est assurément très artificiel, et éloigné des modes habituels d'emploi de la lumière. Ives (79 *bis*), qui s'est livré à des études très approfondies sur cette méthode, assure que, dans des conditions qu'il a indiquées [1], elle conduit aux mêmes résultats que les méthodes rappelées ci-dessus, tout en assurant une précision et une commodité plus grandes, quand les comparaisons sont fortement hétérochromes. Mais ces résultats sont discutés (49 *bis*, 79, 128, 154).

Les divers laboratoires d'étalonnage ne semblent pas encore avoir choisi définitivement entre ces trois méthodes [2]. Aussi l'accord entre leurs étalons secondaires au tungstène est-il moins bien assuré qu'entre les étalons au carbone : les écarts peuvent dépasser largement 2 0/0 (36, 49, 61, 72, 91, 137). On se préoccupe actuellement [3] d'arriver à une entente qui devra porter non seulement sur la méthode à choisir pour les comparaisons hétérochromes, mais encore sur les conditions d'application de cette méthode : dimensions et brillance du champ photométrique, choix des observateurs, etc.

Cette entente comportera sans doute une certaine part d'arbitraire ; mais, selon une remarque de M. Fabry (C.I.E. 1921) « le problème de la photométrie hétérochrome (qu'on pourrait, en se plaçant sur le terrain de la théorie pure, rejeter purement et simplement) présente un intérêt d'ordre pratique, et même commercial : il *doit* être résolu, fût-ce d'une manière en partie conventionnelle ».

On emploiera alors des étalons secondaires « principaux » à filament de tungstène, dont les intensités auront été mesurées conformément à l'accord intervenu entre les divers laboratoires d'étalonnage, et vérifiées par des échanges de lampes entre laboratoires. Ces étalons secondaires principaux seront conservés

---

(1) De façon précise, le champ doit être vu de l'œil sous un angle de 2° et avoir une radiance de 2,5 millilumens par cm² (correspondant à un éclairement de 25 lux sur un écran parfaitement diffusant et non absorbant).

(2) Une quatrième méthode proposée par *Dziobek et Pirani* (128) et expérimentée récemment par *Yamauti et Suzuki* (Communication au Congrès International de l'Éclairage, 1931) consisterait à modifier la lumière de l'étalon au carbone par addition de lumière monochromatique (de longueur d'onde [illegible] mμ) en proportion convenable.

(3) La Commission Internationale de l'Éclairage a insisté récemment sur l'importance de cette question [C.I.E. (1924) 53 à 57 ; (1928) 1105]. Il semble qu'un accord puisse être réalisé prochainement. Il serait basé sur l'emploi de verres bleutés interposés entre l'étalon à filament de carbone et le photomètre, de telle sorte que la lumière transmise ait même couleur que celle des lampes au tungstène (Voir pages 45 et suivantes).

avec le plus grand soin, et utilisés assez rarement pour que leur usure soit très lente. On ne pourra éviter de les comparer périodiquement à l'étalon primaire, mais, même dans les laboratoires spécialisés, cette opération difficile ne s'imposera qu'assez rarement.

On pourrait d'ailleurs la simplifier, en utilisant seulement un petit nombre d'observateurs bien exercés, à condition d'avoir au préalable comparé ceux-ci à « l'observateur moyen » au point de vue de la sensibilité aux diverses couleurs. Des essais ont été tentés dans cette voie au Bureau of Standards (28, 32).

On a aussi songé à faciliter la comparaison des étalons au tungstène avec ceux au carbone en la rendant sensiblement homochrome par interposition entre l'œil et le photomètre d'un écran qui ne transmette qu'une petite partie du spectre; cet écran devrait être tel que son emploi fasse disparaître les divergences entre les résultats obtenus par différents observateurs (dont aucun n'ait une vue très anormale), tout en fournissant un résultat concordant avec la moyenne des résultats obtenus par un grand nombre d'observateurs employant les procédés usuels. Cette méthode, proposée jadis par Crova (31), a été reprise par M. Jouaust ([illegible], [illegible]) au Laboratoire Central d'Électricité. L'écran qui lui a donné les meilleurs résultats avait antérieurement été utilisé par Ives; il est constitué par une cuve de 25 mm d'épaisseur, remplie d'une solution ayant la composition suivante :

$CuCl^2$.	90 g
$Cr^2O^7K^2$.	30 g
NO^3H (à 40° Baumé)	40 cm³
Eau distillée.	pour compléter à 1 litre.

Le chlorure cuivrique absorbe les radiations rouges, auxquelles les yeux des différents observateurs sont le plus inégalement sensibles : on a réduit ainsi la divergence des résultats obtenus dans des comparaisons fortement hétérochromes. On a déterminé d'autre part la concentration du bichromate de potassium de façon à assurer l'identité des résultats obtenus par interposition de l'écran avec la moyenne de ceux qu'on obtient sans écran, dans le cas des étalons au tungstène et au carbone. Mais cette condition n'est plus satisfaite si on se sert du même écran pour comparer une lampe à atmosphère gazeuse avec une lampe au tungstène dans le vide : l'écart systématique atteint alors 1,5 0/0 d'après Jouaust et Waguet (33).

c) Les *lampes à filament de tungstène en atmosphère gazeuse*, dites « demi-watt », ont souvent une intensité lumineuse très variable avec la direction ; aussi les caractérise-t-on en général par leur flux lumineux, comme nous le verrons plus loin.

Pour cette raison, on ne réalise pas d'étalons d'intensité lumineuse à l'aide de lampes de ce modèle; la disposition de leur filament en hélice à spires serrées

serait d'ailleurs défavorable. En l'absence d'étalons secondaires ayant une température de couleur plus élevée que celle des lampes au tungstène dans le vide, on se trouve obligé d'employer ces dernières pour mesurer l'intensité lumineuse des lampes à atmosphère gazeuse et aussi celles des *arcs* et des *manchons Auer*. Ces dernières mesures ont un assez gros intérêt industriel, elles sont en particulier effectuées quotidiennement dans les services de vérification de l'éclairage des grandes villes.

A cause de leur caractère hétérochrome, elles comportent toutes les incertitudes que nous avons rappelées plus haut. Mais il existe un artifice permettant d'éviter ces difficultés aux laboratoires industriels. Il consiste à *associer à un étalon au carbone (ou au tungstène) déterminé un écran coloré* (lame de verre bleuté au cobalt, par exemple) choisi de telle façon que la couleur transmise soit exactement celle des sources que l'on a à photométrer. (On pourrait même, par ce procédé, éviter complètement l'emploi des étalons au tungstène). Cette méthode, proposée par M. Fabry en 1903 (43), a fait depuis lors l'objet de divers travaux (82, 153).

Elle nécessite naturellement toujours une détermination hétérochrome, celle du facteur de transmission de l'écran (c'est-à-dire du rapport des intensités lumineuses de la lampe étalon garnie de son écran, et de la même lampe nue). Mais on effectue cette détermination dans un laboratoire spécial par l'une des méthodes rappelées plus haut, en prenant la moyenne des résultats d'un grand nombre d'observateurs. Elle peut être faite une fois pour toutes si l'écran est inaltérable, ou reproductible avec sécurité.

Il ne faut pas oublier que le facteur de transmission change de valeur si on remplace la lampe étalon à laquelle est associé l'écran par une autre source dont le rayonnement n'ait pas la même composition spectrale; il suffirait en particulier de faire varier la tension aux bornes de la lampe-étalon pour que ce facteur fût modifié.

On peut encore *calculer* le facteur de transmission, si on connait la courbe spectrale de transmission de l'écran, la courbe de répartition spectrale d'énergie de la source à laquelle il est associé, et la courbe de visibilité relative des radiations[1]. La détermination de cette dernière courbe constitue alors la seule mesure hétérochrome. Si les divers laboratoires d'étalonnage adoptaient cette méthode pour l'étude des verres bleus servant à rendre homochromes les comparaisons entre lampes électriques au carbone et au tungstène, en utilisant tous la même courbe de visibilité des radiations, le problème fondamental de l'accord des divers étalons secondaires, exposé page 46, serait par là même résolu. Cette solution, proposée notamment par Crittenden et Meyer (30) semble avoir de grandes chances d'être adoptée prochainement.

---

(1) Voir pour plus de détails *Fabry*, Intr. gén. à la Phot. p. 51 et C. I. E. (1928) 1157.

Voici, d'après une communication présentée au dernier Congrès International de l'Éclairage, diverses valeurs trouvées pour le facteur de transmission d'un verre bleu, associé à une lampe au carbone (température de couleur : 2080° K), et choisi de façon que la lumière transmise ait même couleur (mais non même composition spectrale !) que les lampes-étalon au tungstène dans le vide. Les mesures ont été faites successivement dans les quatre principaux laboratoires nationaux d'étalonnage, et par trois méthodes différentes :

	Laboratoire central d'Électricité	Bureau of Standards	National Physical Laboratory	Physikalische Reichsanstalt	Moyenne
Comparaison directe au photomètre à contrastes.	0,5223	0,5240	0,5296	0,5328	0,5271
Photomètre à scintillation. . . .	0,5119	0,5236	0,5205	0,5260	0,5205
Mesures spectrophotométriques et calcul basé sur la courbe de visibilité relative.	0,5132	0,5220	0,5192	0,5148	0,5172
Moyenne.	0,5158	0,5230	0,5231	0,5244	0,5217

Ces résultats mettent en évidence des variations d'au moins 2 0/0, qu'il sera sans doute possible de réduire en adoptant une méthode unique, probablement celle basée sur l'emploi de la courbe de visibilité relative, et en s'attachant à perfectionner les mesures spectophotométriques qu'elle comporte. Peut-être aussi n'a-t on pas encore trouvé les filtres colorés les plus avantageux.

Au lieu de verre, on peut prendre des feuilles de gélatine teinte, dont la conservation est moins bien assurée, mais dans lesquelles on peut introduire des colorants très variés plus ou moins concentrés. Le tableau IX donne la liste d'un certain nombre d'écrans en gélatine, pour usage photométrique, vendus par la Compagnie Eastman Kodak.

TABLEAU IX. — ÉCRANS PHOTOMÉTRIQUES WRATTEN

L'écran N°	associé à une lampe au tungstène au régime de 6,7 lumens par watt (ou 1,88 w/b) donne une lumière de même couleur qu'une lampe au régime de :	son facteur de transmission est alors approximativement :	Il donne une lumière de même couleur qu'une lampe au régime de 6,7 l/w quand on le place devant une lampe au régime de :
(bleus)			
78	(lumière du jour)	0,12	
78 A	30 l/w ou 0,44 w/b	0,35	1,2 l/w ou 10 w/b
78 B	15 l/w ou 0,84 w/b	0,50	3,5 l/w ou 3,6 w/b
78 C	11 l/w ou 1,15 w/b	0,70	5 l/w ou 2,52 w/b
(jaunes)			
86 C	5,3 l/w ou 2,38 w/b	0,80	10 l/w ou 1,26 w/b
86 B	3,5 l/w ou 3,6 w/b	0,78	15 l/w ou 0,84 w/b
86 A	1,5 l/w ou 8,4 w/b	0,74	25 l/w ou 0,50 w/b
86			(lumière du jour)

N. B. Les consommations spécifiques sont évaluées en watts par bougie d'intensité moyenne sphérique.

D'autres écrans (qui semblent devoir être des plus satisfaisants) sont constitués par des solutions chimiques colorées, contenues dans des cuves à faces parallèles (45) [1]. En faisant varier leur épaisseur et la concentration des liquides, on peut régler (entre certaines limites) la couleur de la lumière transmise. Le facteur de transmission peut être étudié une fois pour toutes, en fonction de la concentration C de la solution et de l'épaisseur du liquide.

Par exemple, d'après Ives et Kingsbury (82), la solution bleue suivante :

Sulfate de nickel et d'ammonium $SO^4NiSO^4(NH^4)^26H^2O$.	60 g
Sulfate d'ammonium $SO^4(NH^4)^2$.	40 g
Ammoniaque ($d = 0,90$ g/cm³).	55 cm³
Eau, compléter à	1 litre

étendue d'eau, de telle sorte que sa concentration dans le mélange soit C, et associée à une lampe au carbone au régime de 4 watts par bougie, a sous une épaisseur de 1 cm un facteur de transmission τ, rapporté à celui de l'eau pure [2], donné par la formule :

$$\log \tau = -0,539\, C^{1,[illegible]}$$

La solution ci-dessus permet de rendre homochrome la photométrie de toutes les sources ayant un spectre continu analogue à celui du corps noir, et une « température de couleur » supérieure à celle de l'étalon au carbone.

Pour des sources plus froides, il faudrait au contraire associer à cet étalon une solution jaune, telle que la suivante :

Sulfate d'ammonium et de cobalt $SO^4CoSO^4(NH^4)^26H^2O$.	100 g
Bichromate de potassium $Cr^2O^7K^2$.	0, 733 g
Acide nitrique ($d = 1,05$ g/cm³)	10 cm³
Eau, compléter à.	1 litre

dont le facteur de transmission τ (à la température de 20° C), dans les mêmes conditions que ci-dessus, est donné par la formule :

$$\log \tau = -0,245\, C^{[illegible]}$$

d'après les mêmes auteurs.

Pour réaliser la couleur des manchons Auer, l'emploi de deux cuves successives serait nécessaire.

Ces écrans liquides sont jusqu'ici trop peu employés. Si de nouvelles recherches confirment leur stabilité, ils pourront rendre dans l'avenir de grands services.

Citons enfin un écran d'un genre tout particulier, utilisé par Priest (136). Il est

---

(1) Dans les mesures au banc photométrique, il faut penser que l'interposition d'une cuve à faces parallèles en avant de l'une des sources équivaut à rapprocher celle-ci d'une certaine longueur, qui n'est pas toujours négligeable, mais qu'il est facile de calculer.

(2) On dispose devant la lampe à filament de carbone d'abord la cuve remplie de la solution étudiée, puis la même cuve remplie d'eau pure, et on mesure le rapport des intensités lumineuses dans les deux cas. On évite ainsi d'avoir à tenir compte des pertes par réflexion sur les parois de la cuve.

constitué par une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe du cristal, et placée entre deux polariseurs ; son facteur d'absorption, pour chaque longueur d'onde, est calculable *a priori* ; on peut le modifier en faisant varier soit l'épaisseur du quartz, soit l'angle des deux plans de polarisation. Ce dispositif a été employé pour des recherches très intéressantes, mais il ne semble guère applicable à des mesures de photométrie courante.

Il serait très souhaitable que, dans un avenir rapproché, les grands laboratoires d'étalonnage, après s'être mis d'accord sur la méthode à appliquer pour la mesure hétérochrome des facteurs de transmission, livrent au public des écrans étalonnés, faciles à employer et à conserver, qui, associés aux lampes étalons à filament de carbone, permettraient de rendre homochromes toutes les mesures usuelles de photométrie industrielle (¹).

7. Etalons électriques destinés aux mesures de flux lumineux, de brillance et d'éclairement. — Les étalons d'intensité lumineuse pouvent en principe suffire à toutes les mesures photométriques, puisque les diverses unités qu'on y utilise dérivent toutes de la « bougie ». Il est cependant commode de réaliser matériellement des étalons secondaires correspondant à certaines grandeurs dérivées, principalement des *étalons de flux lumineux.*

Les mesures habituelles de flux se font en effet à l'aide de lumenmètres, tels que la sphère d'Ulbricht-Blondel, qui se prêtent uniquement à des mesures relatives : on dispose dans la sphère successivement la source à étudier et une autre source (de flux lumineux connu) et on mesure le rapport des brillances que prend dans les deux cas la « fenêtre » du lumenmètre.

La seconde source est donc un véritable étalon secondaire de flux lumineux. Comme les mesures au lumenmètre portent le plus souvent sur des lampes à filament de tungstène à atmosphère gazeuse, les étalons sont aussi constitués par des lampes de ce modèle (²). Leur construction, comme celle des autres lampes électriques étalons, doit être particulièrement soignée, en ce qui concerne l'homogé-

---

(¹) Si la photométrie des sources donnant un spectre de raies : arc au mercure, tubes à gaz raréfiés, etc... venait à présenter un jour un sérieux intérêt industriel, elle devrait faire l'objet de conventions spéciales. Déjà, *Fabry, Buisson et Perrin* ont réalisé un *étalon pour la mesure des lampes au néon* (46) en plaçant devant une lampe étalon ordinaire à filament de carbone (température de couleur : 2046° K) une cuve à faces parallèles de 110 mm d'épaisseur contenant une solution ainsi préparée :

Chromate de potassium	60 g
Acide sulfurique	45 cm³
Eau pour faire	1 litre

Le facteur de transmission de cet écran (*calculé* comme nous l'avons dit page 49) est 0,254.

D'après *Yamauti et Okamoto* (Communication au Congrès International de l'Éclairage, 1931) des filtres de ce type conviennent très bien pour les tubes au néon avec électrodes généralement employés ; mais certains tubes sans électrodes ou à forte excitation donnent une lumière plus bleue. Un autre filtre liquide, formé d'une solution de phénol phtaléine et de soude caustique, a été étudié pour ce cas.

(²) L'enduit intérieur de la sphère est en général très légèrement jaunâtre : aussi la lumière émise par la fenêtre n'a pas la couleur des lampes à atmosphère gazeuse, mais à peu près celle des lampes au tungstène dans le vide : on prend une lampe de ce dernier type comme « tare » sur le banc photométrique.

néité du filament et les contacts électriques ou mécaniques ; mais le mode d'enroulement du filament, la forme de l'ampoule et l'uniformité d'épaisseur du verre ont ici peu d'importance. La lampe doit être « formée » avec soin avant sa mise en service ; les essais électriques et photométriques, les précautions d'emploi sont les mêmes que pour les étalons secondaires d'intensité lumineuse.

On remarquera que ces derniers sont toujours employés la pointe en l'air, tandis que les étalons de flux sont disposés dans la sphère pointe en bas. Quand on retourne ces lampes, leur flux varie considérablement, parce que les courants gazeux à l'intérieur de l'ampoule sont complètement modifiés ; on doit donc les mettre toujours dans la même position.

Pour mesurer leur flux en valeur absolue, on détermine leur intensité lumineuse dans un grand nombre de directions régulièrement réparties dans l'espace, d'où leur intensité moyenne sphérique I_m et leur flux $F = 4\pi I_m$. Cette comparaison avec l'étalon primaire est une opération hétérochrome, comportant toutes les difficultés dont nous avons parlé.

Aussi l'accord entre les étalons secondaires de ce type utilisés par les principaux laboratoires d'étalonnage est-il encore beaucoup moins bon que pour les étalons à filament de tungstène dans le vide. Les écarts, qui peuvent actuellement atteindre 6 0/0 [C. I. E. (1928), 1166] (72) seront sans doute notablement réduits quand ces laboratoires auront adopté une méthode commune pour les mesures hétérochromes.

Voici, par exemple, les caractéristiques d'un étalon de flux du Laboratoire Central d'Électricité (1) :

Tension aux bornes	108,0 volts
Intensité de courant	0,538 ampère
Flux	630 lumens
Coefficient d'efficacité	11,2 lumens par watt

Malgré les précautions prises, les lampes à atmosphère gazeuse sont jusqu'ici beaucoup moins constantes que les lampes dans le vide (2) ; aussi prend-on quelquefois une de celles-ci comme étalon de flux ; on peut lui adjoindre un ou plusieurs écrans colorés convenablement choisis (dont le facteur de transmission sera mesuré une fois pour toutes), afin de rendre homochromes toutes les mesures courantes.

Quoique leur emploi soit beaucoup moins fréquent, on a réalisé aussi des

(1) Les étalons de flux du Bureau of Standards sont des lampes de 500 watts au régime de 18 lumens par watt (80).

(2) D'après *Forsythe et Urbanek* (Communication au Congrès International de l'Éclairage (1931)) ces lampes seraient le siège d'une fluctuation périodique des courants de convection de l'atmosphère gazeuse, d'où résulteraient des variations périodiques de la résistance électrique et du flux émis ; d'autre part, le moindre choc pourrait suffire à déformer leur filament, et par suite à faire varier leur intensité.

Voir toutefois une étude récente de *Teele* (165) concluant à la possibilité d'emploi des lampes à atmosphère gazeuse comme étalons.

étalons de brillance. Ils peuvent être constitués par une lampe à atmosphère gazeuse, à ampoule parfaitement diffusante, « formée » et utilisée comme ci-dessus. Il convient de vérifier que leur brillance est uniforme (ce qui est parfois assez mal réalisé), ou de n'employer qu'une partie de leur surface. On effectue leur étalonnage en mesurant à la façon habituelle l'intensité lumineuse I d'une surface connue S de l'ampoule (en direction normale); d'où la brillance : $B = \frac{I}{S}$.

Voici, par exemple, le résultat obtenu au Laboratoire Central d'Electricité pour une lampe « Argenta » fortement sous-voltée, après 65 heures de formation :

Tension aux bornes.	90,0 volts (au lieu de 110)
Intensité de courant.	0,580 ampère
Brillance.	4,5 bougies par cm²

(la lampe étant orientée culot en bas).

L'uniformité de brillance est probablement mieux assurée dans les étalons proposés par Blondel (8). Ils sont constitués par un verre opalin diffusant par transmission (ou un disque de bristol mat ou de tôle blanche émaillée diffusant par réflexion), éclairé par une ou plusieurs lampes à incandescence placées dans une boite à parois blanches. On règle le courant dans les lampes et leur distance à l'écran de façon que celui-ci ait une brillance de 0,5 b/cm², par exemple.

Rappelons enfin que les *étalons d'éclairement* s'obtiennent en plaçant une surface blanche diffusante à une distance déterminée d'un étalon d'intensité. La plupart des luxmètres comportent un écran de comparaison blanc, qui reçoit la lumière d'une petite lampe électrique et dont l'éclairement a été comparé à celui produit par une source étalon. Ces appareils ne peuvent donner de résultats exacts que si la lampe tare a été bien « formée » et si on règle avec précision (comme nous l'avons dit page 39) la tension aux bornes ou l'intensité du courant. A ce point de vue, les accessoires électriques (accumulateurs, rhéostat, ampèremètre ou voltmètre) livrés avec le luxmètre sont souvent très insuffisants.

CHAPITRE IV

ESSAIS DE RÉALISATION D'UN ÉTALON PRIMAIRE AU MOYEN D'UNE SURFACE DE PLATINE INCANDESCENT OU D'UN ARC ÉLECTRIQUE

1. Insuffisance des étalons photométriques primaires précédemment décrits. — Les lampes électriques à filament incandescent, associées au besoin avec des écrans colorés, permettent, comme nous l'avons vu, de réaliser des étalons *secondaires* commodes et précis, qui satisferont entièrement semble-t-il aux besoins actuels des photométreurs, dès que ceux-ci se seront mis complètement d'accord sur les conventions applicables aux comparaisons hétérochromes.

L'étalon *primaire* décrit au précédent chapitre est, lui aussi, très supérieur à ceux qu'on employait jadis. Mais c'est un étalon « de deuxième espèce » (au sens donné page 7 à cette expression), et la conservation n'en est pas assurée d'une façon absolue. En effet, chaque fois qu'on utilise pour une mesure les lampes qui le constituent, on les use un peu ; et, même lorsqu'on ne s'en sert pas, elles peuvent subir des modifications progressives altérant leur intensité lumineuse. Bien que ce risque ne soit pas très grand, il conduit à considérer l'étalon primaire actuel comme seulement *provisoire*.

Les constructeurs des lampes Hefner et Harcourt avaient espéré réaliser, au prix d'une définition d'ailleurs très compliquée et très arbitraire, des étalons « de première espèce » : la forme de la lampe, le combustible et les conditions d'emploi étant fixés, l'intensité lumineuse devait par là même être déterminée. En fait, comme nous l'avons vu, ces lampes ne sont ni assez stables ni suffisamment reproductibles pour donner avec la précision voulue l'unité d'intensité lumineuse.

On ne possède donc pas encore, à l'heure actuelle, un étalon primaire entièrement satisfaisant; mais on espère l'obtenir bientôt, en se servant d'un « corps noir », comme nous le verrons au prochain chapitre. Avant d'étudier en détail les recherches qui se poursuivent dans cette voie depuis plusieurs années, il convient de rappeler rapidement les principales tentatives antérieures, de voir pourquoi on a dû les abandonner, et quelles utiles indications elles ont pu cependant fournir.

2. L'étalon Violle et les recherches de Petavel. — Une proposition faite, il y a un demi-siècle déjà, par le savant français Violle (164) avait semblé apporter la solution définitive du problème de l'étalon primaire.

Le rayonnement émis par un corps incandescent de surface déterminée dépend à la fois de sa nature et de sa température : Violle songea à utiliser, pour la détermination d'un étalon photométrique, l'une des températures de changement d'état des corps purs (sous la pression atmosphérique), qui fournissent, comme on sait de précieux repères thermométriques. Le corps le plus indiqué était le platine, dont le point de fusion est élevé [1], et qui semblait inaltérable à haute température.

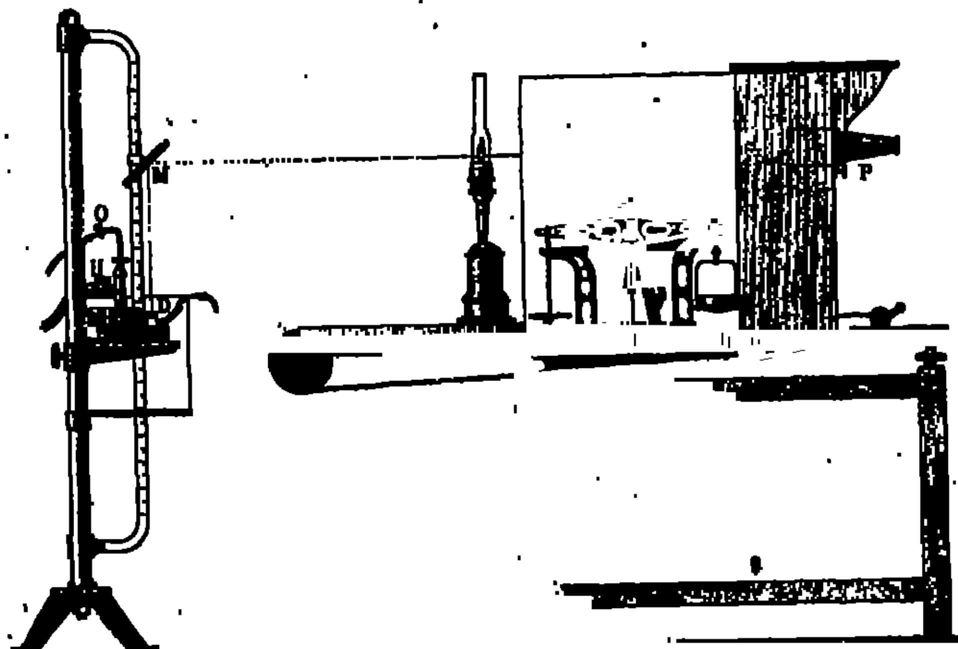


Fig. 16. — Expériences de Violle.

Au cours d'expériences préliminaires, Violle évalua à l'aide d'une pile thermo-électrique et d'un galvanomètre le flux d'énergie provenant d'un bain d'argent par fondu qu'il laissait refroidir ; il vérifia que ce flux prenait une valeur constante pendant toute la durée de la solidification.

Il étudia ensuite, à l'aide d'un spectrophotomètre, pour quatre longueurs d'onde différentes du spectre visible, le rayonnement d'une lampe Carcel et celui

(1) Ce point de fusion serait 1773°,5 ± 1°, d'après les mesures les plus récentes faites au Bureau of Standards par Roeser, Caldwell et Wensel. Violle admettait 1775° ; la connaissance exacte de cette température n'était d'ailleurs pas nécessaire pour l'établissement de son étalon.

d'une surface de platine portée à diverses températures : il trouva que le platine, à son point de fusion, a approximativement la même distribution d'énergie spectrale que la lampe Carcel.

Enfin, Violle compara (au photomètre Foucault) les intensités lumineuses de ces deux sources, en opérant comme suit (fig. 16) (125). Le platine, placé dans un creuset de chaux, était fondu au chalumeau oxhydrique (appareil de Sainte-Claire Deville et Debray) ; puis on laissait refroidir le bain liquide, en le recouvrant d'un diaphragme D dont l'ouverture, rectangulaire, avait une surface exactement connue (de l'ordre de 3 à 6 cm²) ; ce diaphragme était noirci, et refroidi

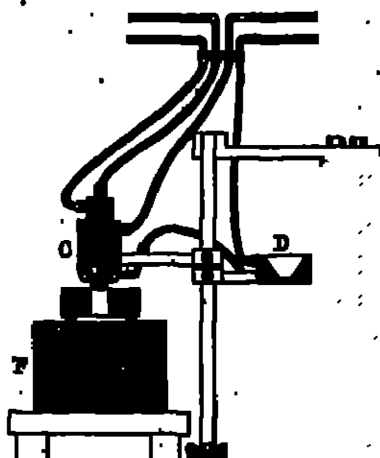


Fig. 17. — Four à fusion de platine (Petavel).

par une circulation d'eau. La lumière émise soit normalement, soit sous un angle de 45°, était renvoyée dans la direction du photomètre P par un miroir M de pouvoir réfléchissant connu.

Violle trouva que l'intensité lumineuse du bain de platine, d'abord décroissante, prenait pendant la durée de la solidification une valeur constante, égale à 2,08 carcels (moyenne des résultats de 7 expériences bien concordantes). Puis, après une brusque augmentation, sorte « d'éclair » marquant la fin de la solidification, l'intensité recommençait à décroître.

Violle proposa, en conséquence, d'adopter, comme unité de lumière blanche, « la quantité de lumière émise en direction normale, par un centimètre carré de surface d'un bain de platine pur fondu, à la température de solidification ».

Comme nous l'avons rappelé au chapitre premier, cette proposition fut ratifiée en 1884 par la Commission Internationale pour la définition des unités électriques ; et le Congrès International des Électriciens tenu à Paris en 1889 (25) définit la *bougie décimale* comme le vingtième de l'unité Violle.

Malheureusement, quand on voulut reproduire celle-ci, on se heurta à des difficultés inattendues. A la *Physikalische Technische Reichsanstalt* Lummer (107), en comparant à l'intensité lumineuse d'une lampe Hefner la brillance du platine à température de solidification, trouva une valeur moyenne supérieure de plus de 25 0/0 à celle qui résultait des nombres de Violle. Des expériences de Dibdin (35 *bis*) indiquèrent (ce qu'on pouvait prévoir) que la présence de particules de corps étrangers sur la surface du métal provoquait souvent des erreurs importantes.

De longues recherches furent poursuivies entre 1896 et 1899 au *National Physical Laboratory* par Petavel, afin de déterminer les meilleures conditions de réalisation de « l'étalon au platine ». Après plusieurs centaines d'expériences, on aboutit aux conclusions suivantes (131) :

1° Le platine employé doit être chimiquement pur (en fait, ni dans le mémoire de Violle, ni dans celui de Petavel, on ne trouve d'indications précises sur la nature et la proportion maximum des impuretés éventuelles).

2° Le creuset dans lequel on le fond doit être fait de chaux pure (la magnésie ou l'alumine ne sont pas suffisamment cohérentes pour soutenir le métal fondu) ; il suffit que cette chaux contienne 1/4 0/0 de silice pour que le rayonnement du platine soit altéré.

3° Le chalumeau servant à effectuer la fusion doit être alimenté avec de l'hydrogène exempt d'hydrocarbures : en présence de carbone, le platine s'altère, à haute température. En remplaçant l'hydrogène par du gaz d'éclairage, Petavel constata que la surface du métal se recouvrait d'une pellicule blanche et que sa brillance (à la température de solidification) était augmentée de 36 0/0.

4° Il faut obtenir un refroidissement aussi lent que possible : le four employé F (figure 17) était très bien calorifugé; son couvercle était percé d'un trou étroit (1 cm²,6), au-dessus duquel on amenait successivement soit le chalumeau C, soit un diaphragme D d'ouverture connue (1 cm²), à circulation d'eau.

Il faut d'autre part éviter de surchauffer le platine, car le métal vaporisé se condenserait sur le couvercle du four et retomberait ensuite dans le bain en entraînant des impuretés.

5° La masse de platine employée doit être suffisante pour que la période de solidification dure au moins 1 demi-minute. Le lingot ne doit être ni trop plat, ni trop épais : dans l'un ou l'autre cas, on ne pourrait le fondre complètement sans le surchauffer beaucoup. Petavel fut satisfait des résultats obtenus avec un disque pesant 345 grammes et ayant 17 cm² de base ; il pensait toutefois qu'un lingot hémisphérique de 1000 ou 2000 g serait encore préférable.

6° La brillance du bain de platine, mesurée de 10 en 10 secondes en valeur relative (on la compar, à l'aide d'un photomètre Lummer et Brodhun, à l'intensité d'une lampe tare à filament incandescent), variait en général au cours du

refroidissement comme l'indique la courbe ci-dessous (figure 18), qui comporte trois régions de pentes très différentes MN, PQ, RS. La branche MN correspond à la période où le métal est tout entier à l'état liquide; il y avait en général surfusion pendant quelques dizaines de secondes. La fin de la surfusion était marquée par une brusque augmentation de l'intensité lumineuse (¹); celle-ci restait ensuite, pendant un temps parfois supérieur à 1 minute, non pas rigoureusement constante, mais très lentement décroissante (région PQ de la courbe). La

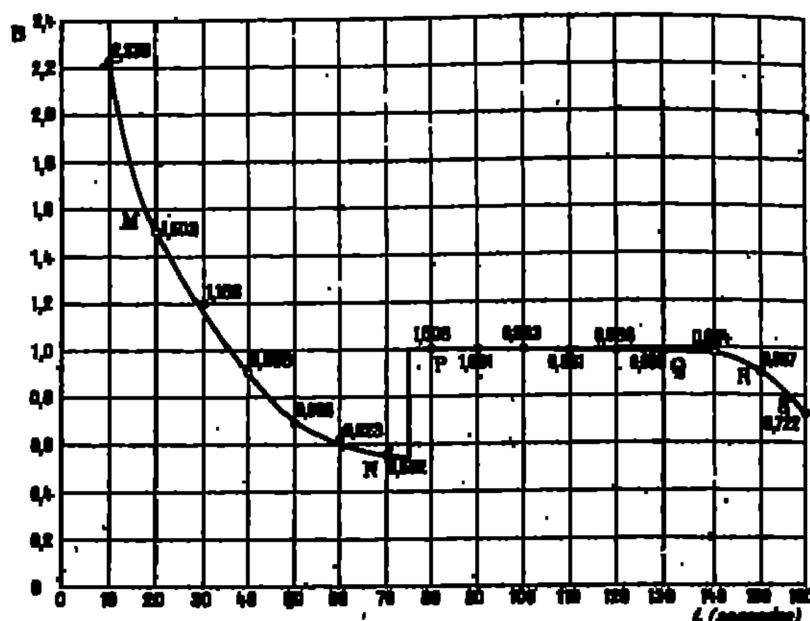


Fig. 18. — Variations de brillance d'un bain de platine avant, pendant et après la solidification (d'après Petaval).

vitesse de décroissance était d'ailleurs variable avec la masse du métal employé et les conditions de refroidissement.

Aussi n'était-ce pas la moyenne des mesures effectuées pendant toute cette période qui représentait, selon Petaval, l'intensité de l'étalon Violle, mais plutôt la valeur qu'on aurait obtenue en faisant une mesure précise au début de la solidification. Cette valeur était déterminée, comme l'indique la figure 19, par extrapolation graphique de résultats des mesures suivantes. Dans certains cas, le métal ayant été très peu surchauffé, la surfusion ne se produisait

(¹) *Petaval* observait même une sorte d'éclair au début de la solidification (à condition qu'il y ait eu surfusion), tandis que *Violle* avait constaté un phénomène analogue *à la fin* de la période d'intensité constante.

pas ; il n'y avait alors pas de discontinuité entre les branches MN et PQ, ce qui rendait la détermination moins précise.

La portion RS de la courbe correspond au refroidissement du platine solide ; elle se raccordait toujours sans coude brusque avec la branche PQ, peut-être parce que l'intérieur du bloc métallique restait encore quelque temps à l'état liquide après solidification de toute la surface.

Les expériences de Petavel l'amenèrent à conclure que, dans les conditions d'emploi les plus favorables déterminées par lui, l'étalon Violle semblait repro-

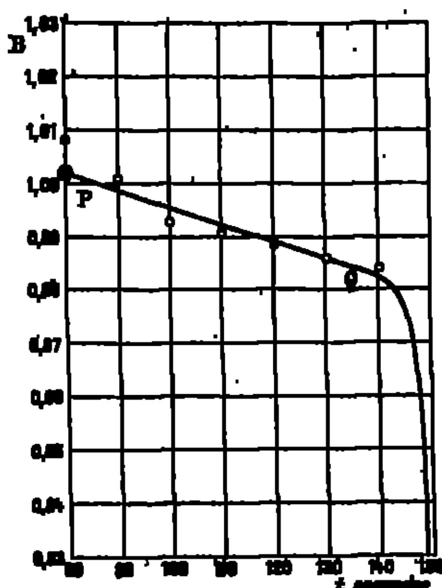


Fig. 19. — Variations de brillance d'un bain de platine en train de se solidifier. (Extrapolation graphique de Petavel).

ductible à au moins 1 0/0 près. Ces recherches « préliminaires » devaient être suivies d'une comparaison précise entre l'appareil ainsi réalisé et les divers étalons photométriques en usage à cette époque ; mais le résultat de ces nouvelles mesures fut sans doute décevant, car il n'a, croyons-nous, jamais été publié.

On ne fut pas plus heureux en France, au cours de tentatives d'utilisation de l'étalon Violle, poursuivies notamment au *Laboratoire Central d'Electricité* par Laporte.

Pour s'expliquer cet insuccès, on peut remarquer, en premier lieu, que la présence d'impuretés dans le platine (même en faible proportion) suffit à faire varier notablement son point de fusion, et modifie en outre le rayonnement qu'il émet à une température déterminée. Or il est bien difficile de le débarrasser complètement des divers métaux (rhodium, iridium, etc.) qui l'accompagnent dans son

minerai ; et plus difficile encore de le fondre sans le contaminer, car il semble être, à haute température, bien plus altérable qu'on le croyait jadis (51, 131) (¹).

D'autre part, c'est par ses parois, et principalement par la région découverte dont on observe le rayonnement, que le bain de platine se refroidit ; il est donc, pendant qu'on effectue les mesures photométriques, toujours un peu plus chaud en son centre qu'à sa surface. Et la température de celle-ci n'est probablement ni rigoureusement constante, ni même uniforme pendant toute la durée de la solidification.

Enfin, il est assez difficile d'isoler la lumière émise par le platine de celle qui peut provenir de l'enceinte et être réfléchie par le métal dans la direction de l'observateur. Cette dernière cause d'erreur, dont les recherches théoriques sur le « corps noir » ont précisé l'importance, ne fut sans doute pas complètement écartée par Violle ni même par Petavel.

3. Propositions de Siemens et de Lummer et Kurlbaum. —

L'étalon Violle avait, entre autres inconvénients, celui d'exiger l'emploi d'un dispositif de chauffage assez compliqué et d'une masse considérable de métal précieux. Dès 1881, Siemens (146) avait suggéré une modification qui l'aurait rendu beaucoup plus simple et moins coûteux.

Le dispositif proposé se composait essentiellement d'un mince ruban de platine de 5 à 6 mm de largeur et environ 0,015 mm d'épaisseur, parcouru par un courant électrique qui le portait à l'incandescence. En avant de lui était un écran opaque percé d'une ouverture ayant aussi exactement que possible 0,1 cm². On mesurait à intervalles rapprochés l'intensité de la lumière émise à travers le diaphragme, tout en augmentant progressivement le courant jusqu'au moment où le ruban fondait : à cet instant, la valeur de l'intensité lumineuse devait être égale à 0,1 unité Violle (c'est-à-dire à 2 bougies décimales), en admettant que la brillance du platine solide, à la température de fusion, soit la même que celle du platine fondu en train de se solidifier.

On sait aujourd'hui que cette condition n'est pas réalisée ; d'après Burgess et Waltenberg (18 *bis*), le pouvoir émissif monochromatique du platine, pour la longueur d'onde 0,65 μ, passerait brusquement de 0,33 à 0,28 au cours de la fusion. L'étalon Siemens était donc nettement différent de l'étalon Violle.

Cet appareil permettait d'effectuer en un temps court de nombreuses expériences : après chacune d'elles, il était facile d'amener entre deux pinces reliées à la source du courant une portion nouvelle d'un long ruban de platine enroulé sur l'appareil.

(¹) Pour éviter le risque de contamination du métal par l'atmosphère du four à gaz, *Petavel* (131) avait bien cherché à fondre le lingot de platine destiné à servir d'étalon en le posant sur un bloc de chaux et en y faisant passer un courant électrique très intense ([illegible] ampères, pour une bande ayant seulement 70 mm² de section) ; mais cette méthode ne lui donna pas de bons résultats.

Malheureusement, les résultats de ces expériences étaient très peu constants, comme l'ont montré Liebenthal (101) et surtout Lummer et Kurlbaum (109), qui trouvèrent entre plusieurs mesures successives des écarts atteignant 10 0/0.

Ces variations s'expliquent aisément ; en effet, l'intensité lumineuse du platine n'était pas constante, mais augmentait plus ou moins rapidement, avant de retomber brusquement à zéro par suite de la fusion du ruban; il était bien difficile de déterminer avec précision le maximum ainsi atteint. D'autre part, s'il est vrai que le platine courait, dans l'appareil de Siemens, moins de risques de contamination que dans ceux de Violle ou de Petavel, sa température y était en revanche encore moins uniforme, et il arrivait souvent que le ruban se déchirait ou s'effondrait avant que la fusion eût réellement commencé.

Des essais analogues de Crova (32) se heurtèrent aux mêmes difficultés.

Lummer et Kurlbaum jugèrent, en 1894 (110), qu'on y pouvait obvier en employant comme étalon une lame de platine pur dont la température, sensiblement inférieure à celle de fusion, était repérée de la façon suivante. Un système absorbant sélectif déterminé (constitué par une couche d'eau pure de 2 cm d'épaisseur, contenue dans une cuve à faces parallèles en quartz de 1 mm de paroi) était à volonté interposé entre la lame incandescente et un bolomètre. On mesurait ainsi son facteur de transmission τ, qui dépendait de la composition spectrale du rayonnement émis par la lame : la température de celle-ci était fixée par la condition : $\tau = \frac{1}{10}$.

La lame de platine avait environ 25 mm de largeur, 60 mm de longueur et 0,015 mm d'épaisseur ; elle était chauffée électriquement. On la plaçait dans des conditions de refroidissement bien constantes en l'entourant d'une cloche à circulation d'eau, munie de diaphragmes.

Dans un appareil analogue de Petavel (68, 132), on repérait la température d'une lame de platine incandescente par cette condition que, pour la lumière émise, le pouvoir absorbant d'une couche d'eau d'épaisseur déterminée était égal à celui d'une certaine lame de spath fluor (les mesures étaient effectuées à l'aide de deux piles thermoélectriques, par une méthode d'opposition).

Les étalons ainsi déterminés d'une façon très arbitraire, mais ingénieuse, n'ont pas fait l'objet de nombreux essais. Leur précision était médiocre, à cause des grosses difficultés que présentent les mesures de rayonnement total. On semble avoir définitivement renoncé aujourd'hui à réaliser, avec une constance et une reproductibilité suffisantes, un étalon lumineux utilisant le rayonnement propre du platine. D'ailleurs, la couleur de ce rayonnement qui, à la température de solidification, est à peu près celle de la lampe Carcel, et qui, dans l'appareil de Lummer et Kurlbaum, serait encore plus rouge, se prêterait mal à la photométrie de précision des sources les plus employées à l'heure actuelle.

4. L'arc étalon. — Dès 1878, Abney (1) avait indiqué que, si on modifie les conditions de fonctionnement d'un arc électrique entre charbons homogènes, la surface des électrodes qui se trouve portée à l'incandescence varie, en même temps que l'intensité du courant, de telle façon que la brillance de la région centrale du cratère positif reste sensiblement constante, quels que soient, d'ailleurs, le diamètre et l'écartement des charbons. Violle (166) trouva pour cette brillance la valeur approximative 16.000 bougies par centimètre carré (quelle que soit la puissance consommée, entre 600 et 34 000 watts).

Pour expliquer cette constance, on admettait que le cratère était porté à une température déterminée, celle de l'ébullition (ou plutôt de la sublimation) du carbone sous la pression atmosphérique.

D'ailleurs la couleur de l'arc au carbone, intermédiaire entre celle du jour et celle des principales sources artificielles de lumière, conviendrait bien pour un étalon photométrique ; on eut donc l'idée de l'employer à cet usage, en plaçant bien entendu le charbon négatif de telle façon qu'il n'interceptait pas la lumière émise par le charbon positif, et en disposant, en avant de celui-ci, un diaphragme refroidi d'ouverture assez petite (les bords du cratère sont, en effet, moins brillants que son centre).

Cette proposition fut faite par Abney lui-même (qui redoutait toutefois une action perturbatrice de la colonne lumineuse séparant les charbons), et reprise au Congrès des Electriciens, à Chicago, en 1893, simultanément par Swinburne, Thompson (156, 156 *bis*) et Blondel (6).

Mais ce dernier, ayant trouvé pour la brillance de l'arc des valeurs comprises entre 150 et 163 b/mm², n'envisageait son emploi que comme étalon secondaire. Trotter (157) obtint aussi des résultats assez variables. Et Petavel (122) observa sur la lumière d'un arc, à régime électrique constant, des fluctuations atteignant 10 0/0 (autour d'une valeur moyenne de 147 b/mm²).

En 1914, Lummer mit en évidence, au cours d'un important travail (¹), l'augmentation de température du cratère de l'arc avec la pression du gaz où il se produit, et indique que, dans certaines conditions, il y a une véritable fusion du carbone sur ce cratère. A la pression atmosphérique, plusieurs régimes seraient possibles : le carbone ne passerait par l'état liquide, avant de se volatiliser, que si la densité du courant est assez faible (par exemple 5 ampères pour des charbons très purs, de 6 mm de diamètre) ; il y aurait alors une véritable ébullition, et la

---

(¹) *Lummer*, Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur, Vieweg, éditeur, Braunschweig (1914).

Ce mémoire a été résumé par *[illegible]*, p. 216 à 2[illegible], 278, et 317 à 321 de l'ouvrage « Fours électriques et Chimie » publié sous la direction de *P. Lebeau*, Presses Universitaires, éditeur Paris (1924). Le même volume contient, p. 378 (article de *[illegible]*), un tableau des recherches antérieures sur la température de l'arc.

D'après une étude critique de *Ribaud* (Traité de pyrométrie, p. 433), la température « normale » de l'arc entre charbons purs, sous la pression atmosphérique doit être comprise entre 3 900 et 4 000° K.

température (évaluée par Lummer à 4200°K) serait notablement plus élevée que lorsque le cratère reste à l'état solide.

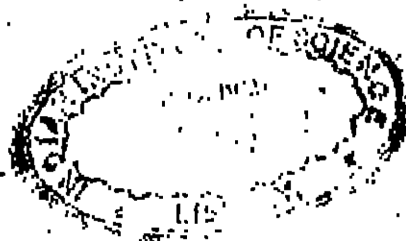
Ces résultats ont été précisés par Kohn et Guckel (66 *bis*) : pour des électrodes homogènes en charbon très pur ou en graphite, la brillance du cratère positif augmente avec la densité de courant quand celle-ci est inférieure à 0,3 ampères par mm². Elle est constante (sous la pression atmosphérique), quelles que soient la nature du gaz où se forme l'arc (Air, CO^2, Az, Ar), la longueur de celui-ci (entre certaines limites) et les dimensions des charbons, pourvu que la densité de courant reste comprise entre 0,3 et 2,1 a/mm².

Au cours d'un travail assez récent, Allen (2), reprenant une idée de Forrest (56), utilisait deux électrodes négatives également inclinées par rapport au charbon positif, et trouvait pour celui-ci une brillance constante (172 b/mm²) en employant des baguettes à 8 mm de diamètre, et une intensité de courant inférieure à 5 ampères (1).

Mais les fréquentes variations de l'arc, que Lummer a signalées, de même que Blondel et Petavel, semblent bien inévitables à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu.

Les essais de réalisation d'un étalon primaire que nous venons d'évoquer n'ont pas été complètement infructueux ; ils consistaient, en somme, à utiliser l'incandescence d'un corps déterminé porté à une température fixe : ils ont servi de guides aux tentatives ultérieures, où l'on a cherché à éliminer par l'emploi d'un « corps noir » toutes les difficultés dues au manque d'homogénéité ou de pureté de la substance rayonnante.

(1) *Mac Gregor Morris* attribue à cet étalon une précision d'environ 2 0/0 (C.I.E. ([illegible]), [illegible]).
L'arc électrique a servi également d'étalon pour certaines mesures spectrophotométriques de faible précision.



CHAPITRE V

LE « CORPS NOIR » ÉTUDIÉ EN VUE DE SON EMPLOI COMME ÉTALON PHOTOMÉTRIQUE PRIMAIRE

1. Intérêt qu'offre l'emploi du corps noir ; difficultés à surmonter. — *a) Définition.* — Les physiciens appellent *corps noir* tout système absorbant complètement les radiations qui tombent sur lui (quelles qu'en soient la nature et la direction). On sait que tous les corps rayonnent constamment de l'énergie ; à une température déterminée, ce sont les corps noirs qui en émettent le plus [1], d'où le nom de *radiateur intégral* qu'on leur donne aussi quelquefois [2]. Ils ont par suite tous le même rayonnement ; c'est ce qui a fait la fécondité de la notion de « corps noir ».

Dans le cas du rayonnement purement thermique, la brillance énergétique spectrale B' [3] d'un corps quelconque A (pour une longueur d'onde, une direction et un état de polarisation déterminés) est liée à la brillance spectrale B du corps noir (à la même température et pour la même longueur d'onde) et au facteur d'absorption α [4] du corps A (relatif à la même longueur d'onde, à la même direction et au même état de polarisation) par la formule simple :

$$B' = \alpha B \text{ (\textit{Loi de Kirchhoff})}.$$

Nous nous appuierons souvent sur cette relation, qui permet d'évaluer l'écart existant entre le rayonnement d'un corps réel et celui d'un corps parfaitement noir.

C'est en 1860 que Kirchhoff introduisit dans la science la notion de « corps noir » (96) ; elle resta longtemps purement théorique, car les corps qui satisfaisaient le mieux à la définition précédente (tels que le noir de fumée, le noir de platine, etc.) avaient encore pour certaines longueurs d'onde un facteur d'absorption nettement inférieur à l'unité et d'ailleurs assez mal connu.

Mais en 1895, Wien et Lummer (171) ont montré qu'on pouvait réaliser un corps parfaitement noir en utilisant une enceinte fermée, à température uniforme, percée d'un très petit trou : les radiations qui pénètrent par cette ouverture finissent, en effet, par être totalement absorbées au cours des réflexions successives à l'intérieur de l'enceinte. Par suite, le rayonnement émis à travers le trou est aussi celui d'un corps noir : il varie avec la température de l'enceinte, mais *est indépendant de la nature de celle-ci.*

---

(1) En laissant de côté les cas de luminescence.

(2) Cette expression est, à l'étranger comme en France, beaucoup moins utilisée que la précédente. Elle serait pourtant préférable : il est un peu choquant de parler, comme nous aurons à le faire, « des variations de la couleur du corps noir avec la température »...

(3) Notations employées par *M. Fabry*, Intr. gén. à la phot., p. 128.

(4) Le facteur d'absorption d'un corps est le rapport du flux rayonnant absorbé par lui au flux incident.

Nous avons vu combien l'intensité des sources constituées par une flamme, un filament ou un bain de métal incandescent est influencée par la présence d'impuretés dans le combustible ou le métal utilisé. Le dispositif de Lummer et Wien étant à l'abri de cette cause d'erreur, il était indiqué de chercher à l'employer comme étalon radiométrique, et en particulier comme étalon photométrique.

Cette proposition fut émise par Blondel dès 1896 (7) — quelques mois après la première réalisation d'un « corps noir » expérimental — et maintes fois reprise depuis lors (65, 124 *bis*, 167, 169 *bis*, 179). Mais elle s'est heurtée à de grosses difficultés expérimentales, que seules les recherches entreprises au cours des dernières années ont donné l'espoir de surmonter [1].

b) *Les lois du rayonnement du corps noir* (résultant d'études à la fois théoriques et expérimentales) ont été exposées en détail dans le premier ouvrage de cette Encyclopédie (Fabry, Intr. gén. à la phot., p. 115 à 137). Rappelons-les rapidement, en utilisant les mêmes notations.

L'une des plus importantes de ces lois est celle de *Planck* : si on désigne par $r_\lambda d\lambda$ [2] le flux émis entre les longueurs d'onde λ et $\lambda + d\lambda$ par 1 cm² de surface d'un corps noir à la température T, on a :

$$r_\lambda = k\lambda^{-5}\left(e^{\frac{C}{\lambda T}} - 1\right)^{-1},$$

e étant la base des logarithmes népériens, k et C deux constantes dont les valeurs les plus probables, d'après Coblentz (24), sont :

$k = 3{,}707\ 10^4$ (en prenant le watt pour unité de puissance).

$C = 14320$ (en mesurant les longueurs d'onde en microns et les températures en degrés centigrades).

Il en résulte que la radiance énergétique $\mathcal{R}$ du corps noir varie comme la quatrième puissance de la température absolue :

$$\mathcal{R} = \sigma T^4 \qquad (\textit{loi de Stefan})$$

(Si le corps noir est placé dans une enceinte dont la température absolue est T_0, il ne rayonne en réalité par cm² qu'une puissance $\sigma(T^4 - T_0^4)$, mais dans tous les cas qui nous intéressent T_0^4 est négligeable devant T^4).

La constante σ est égale à $6{,}4939\ \frac{k}{C^4}$, sa valeur la plus probable est

$$\sigma = 5{,}72\ 10^{-12}\ \text{watt. cm}^{-2}\text{. degré}^{-4}.$$

Le rayonnement du corps noir suit la *loi de Lambert* ; sa brillance énergétique est par suite

$$\mathcal{B} = \frac{\mathcal{R}}{\pi} = \frac{\sigma}{\pi} T^4.$$

---

[1] En dehors de son emploi éventuel comme étalon d'intensité lumineuse, le corps noir rend des services de plus en plus nombreux pour les mesures spectrophotométriques (notamment pour la détermination de la température de couleur des diverses sources de rayonnement) (17, 74), ainsi qu'en pyrométrie optique.

[2] r_λ peut être appelé « radiance spectrale » (*Fabry*, Intr. gén. à la phot., p. [illegible]). La brillance spectrale b_λ est reliée à la radiance spectrale par la *formule de Lambert* $r_\lambda = \pi b_\lambda$.

Enfin, la *brillance lumineuse* B du corps noir peut, si on connaît l' « équivalent mécanique de la lumière » M [1] et le facteur de visibilité relative V_λ pour la radiation de longueur d'onde λ, être calculée par la formule :

$$B = \frac{1}{\pi M} \int V_\lambda r_\lambda d\lambda$$

(l'intégrale étant étendue à tout le spectre visible).

TABLEAU X. — VARIATIONS DE LA BRILLANCE DU CORPS NOIR EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Colonne 1. Température absolue T (°K).
2. Brillance B (bougies par cm²) calculée par Ives.
3. — B — déduite de la formule de Fabry.
4. — B — observée par Hyde, Forsythe et Cady (résultats bruts).
5. — B — — — (résultats revisés par Ives).
6. Variation relative de brillance, par degré (déduite de la formule de Fabry).

1	2	3	4	5	6
T	B (b/cm²)				$\frac{dB}{BdT}$
(°K)	(Ives)	(Fabry)	(H.F.C.)	(H.F.C.I.)	
1400	0,242	0,2429			$12,2\ 10^{-3}$
1600	2,08	2,085			9,5
1700	5,10	5,093	5,08	5,06	8,4
1750	7,69	7,676	7,64	7,63	8,0
1800	11,3	11,31	11,3	11,2	7,6
1850	16,4	16,35	16,3	16,2	7,16
1900	23,2	23,17	23,1	23,0	6,81
1950	32,3	32,29	32,2	32,0	6,48
2000	44,4	44,28	44,3	44,0	6,16
2050	59,9	59,90	60,0	59,6	5,88
2100	79,8	76,73	80,1	79,9	5,62
2150	105	104,9	105,7	104,9	5,37
2200	137	136,3	137,6	136,4	5,13
2250	175	175,1	177	175	4,91
2300	223	222,7	226	222	4,71
2350	281	280,4	284	280	4,52
2400	350	349,6	354	350	4,33
2450	433	432,3	438	433	4,16
2500	531	530,2	537	527	4,00
2550	645	644,9	651	641	3,85
2600	780	778,9	785	775	3,71
2650	934	934,3	939	927	3,57
2700		1114			3,44
2750		1319			3,31
2800		1552			3,20
2850		1817			3,10
2900		2116			3,00
2950		2452			2,90
3000	2830	2827			2,80
3500		$0,943\ 10^4$			2,07
4000	$2,33\ 10^4$	$2,340\ 10^4$			1,59
5000	$8,40\ 10^4$	$8,410\ 10^4$			1,03
6000	$1,98\ 10^5$	$1,983\ 10^5$			0,72

[1] Cette expression couramment employée, quoique assez impropre, représente l'inverse du coefficient de visibilité K_0 correspondant à la longueur d'onde de visibilité maximum (0,555µ) (*Fabry*, Intr. gén. à la phot., p. 44).

On appelle *coefficient de visibilité*, pour une radiation monochromatique, le rapport du flux

Ce calcul a été effectué successivement par divers auteurs (13, 118, 133 *bis*), en partant de données numériques assez incertaines ; le travail le plus récent est celui de Ives (81) qui a admis pour V_λ les nombres de Gibson et Tyndall (82), et pour M

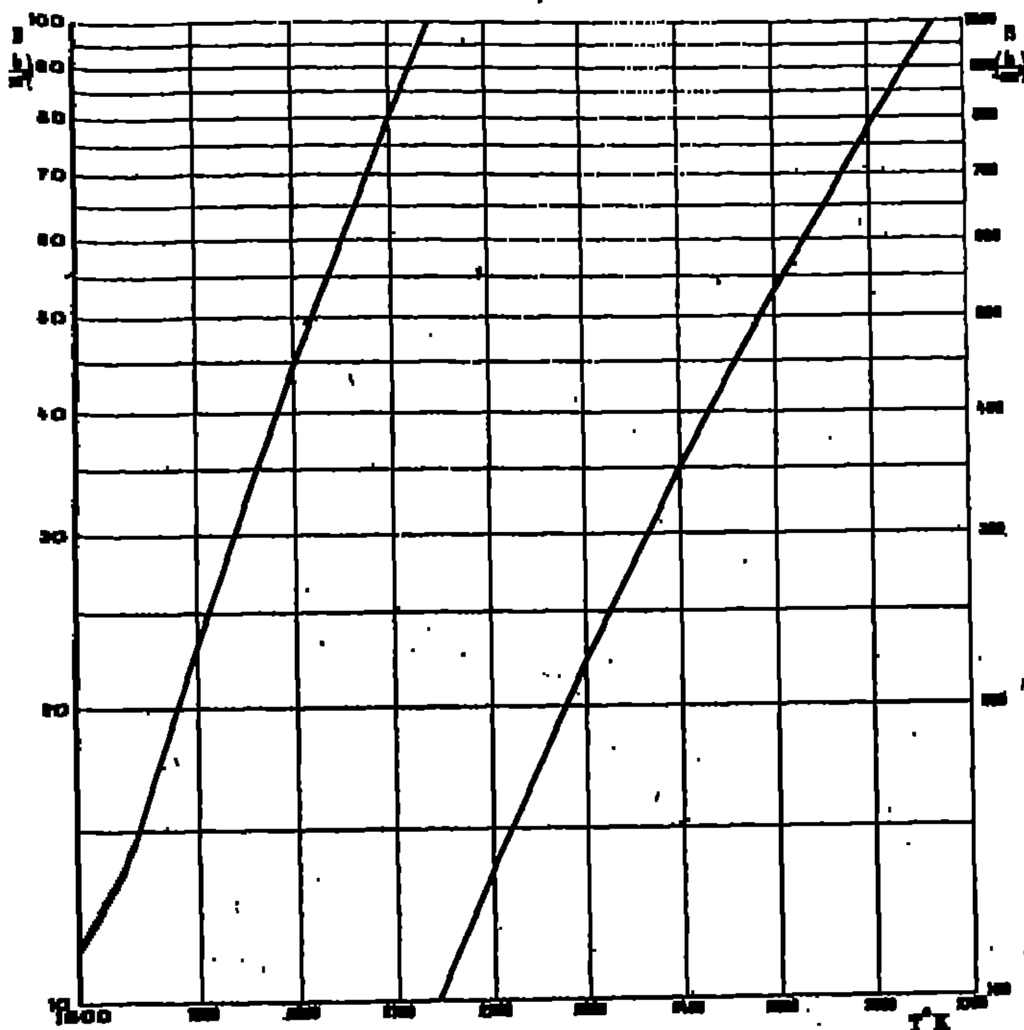


Fig. 20. — Variations de la brillance du corps noir en fonction de la température absolue (ordonnées logarithmiques).

la valeur 0,001 61 watt par lumen. On en trouvera les résultats dans le tableau X ci-contre (colonnes 1 et 2).

---

lumineux au flux d'énergie correspondant. Le *facteur de visibilité relative* d'une radiation monochromatique est le rapport du coefficient de visibilité de cette radiation à la valeur maximum du coefficient de visibilité.

La colonne 3 du même tableau reproduit les nombres calculés par M. Fabry (Intr. gén. à la phot., p. 131) à l'aide de la formule empirique :

$$\log B = 7{,}1842 - 1{,}1444\left(\frac{10^4}{T}\right) + 0{,}00736\left(\frac{10^4}{T}\right)^2$$

(dans laquelle B est la brillance, en bougies par cm², et T la température absolue, en degrés centigrades). On voit que cette formule représente très bien les résultats de Ives.

Nous avons tracé sur la figure 20 la courbe $\log B = f(T)$ dans l'intervalle 1600-2650°K. Elle met en évidence la très rapide croissance de la brillance du corps noir en fonction de la température.

En dérivant la formule ci-dessus, on obtient la relation :

$$\frac{1}{B}\frac{dB}{dT} = \frac{1}{T}\left[2{,}035\,\frac{10^4}{T} - 0{,}034\left(\frac{10^4}{T}\right)^2\right].$$

qui a permis de calculer les nombres de la colonne 6 (tableau X). L'augmentation relative de brillance du corps noir, pour une augmentation de température de 1 degré, est supérieure à 0,6 °/ₒ au-dessous de 2000°K, à 0,5 °/ₒ au-dessous de 2200°K, et à 0,4 °/ₒ au-dessous de 2600°K.

e) Mesures photométriques sur le corps noir. — Cette rapide variation explique les difficultés qu'on rencontre lorsqu'on veut déterminer expérimentalement la brillance du corps noir avec une grande précision, ou encore lorsqu'on cherche à utiliser ce radiateur comme étalon. Il faut, en effet, non seulement réaliser une enceinte percée d'une ouverture très petite (par rapport à sa surface totale) et susceptible d'être portée à une température élevée, uniforme, et constante pendant la durée d'une série de comparaisons photométriques, mais encore repérer cette température à une fraction de degré près (¹).

Aussi les mesures de ce genre furent-elles peu nombreuses, jusqu'ici ; les premières ont été faites en 1901 par Lummer et Pringsheim (112) (à des températures inférieures à 1700° K), puis en 1906 par Nernst (124), qui trouva, pour le corps noir, une brillance d'environ 1 bougie Hefner par mm² (90 bougies internationales par cm²) à 2091°K, et proposa de l'employer, à cette température, comme étalon photométrique. Nous n'insisterons pas sur ces expériences, qui étaient peu précises.

Des recherches bien plus soignées ont été effectuées, il y a quelques années, par Hyde, Forsythe et Cady (77) ; leurs résultats sont indiqués sur le tableau X (colonne 4). Ces auteurs n'ont pas indiqué jusqu'à quel point les températures réalisées dans leur appareil étaient constantes et uniformes, ni quel était le degré de

(¹) Il est plus facile de régler un corps noir en vue de son emploi comme étalon de distribution spectrale d'énergie, car les valeurs *relatives* des brillances monochromatiques varient moins vite en fonction de la température que leurs valeurs absolues ou que la brillance lumineuse.

précision de leurs diverses mesures. L'emploi du pyromètre à rayonnement monochromatique qu'ils utilisaient comporte, en particulier, une incertitude de plusieurs degrés. Ives a récemment revisé leurs calculs, et les nombres ainsi corrigés (tableau X, colonne 5) sont en parfait accord avec ceux qu'il a déterminés indirectement, à partir de la formule de Planck, de l'équivalent mécanique de la lumière, et des facteurs de visibilité relative des diverses radiations. Les données numériques (K, C, M, V_λ) intervenant dans le calcul ne sont pas encore très exactement connues ; des comparaisons de ce genre ont donc une grande importance. C'est d'ailleurs en vue de déterminer l' « équivalent mécanique de la lumière » M que Hyde, Forsythe et Cady avaient entrepris leur travail. Ces physiciens, tout en signalant l'intérêt éventuel d'un « corps noir étalon », ne se sont pas appliqués à le réaliser effectivement dans des conditions assurant le maximum de constance et de reproductibilité. Ils indiquent qu'à 2077°K sa couleur serait celle des lampes à filament de carbone et sa brillance 70,2 b/cm².

Comme leurs recherches portaient sur un domaine allant de 1700 à 2650°K, ils se sont heurtés aux difficultés spéciales à la photométrie hétérochrome : la couleur du corps noir, en effet, varie, elle aussi, beaucoup avec sa température. Mais de cette variation, il résulte qu'on peut choisir — entre certaines limites — la couleur du corps noir destiné à servir d'étalon primaire. La plus favorable est sans doute celle des étalons secondaires à filament de tungstène, dont l'usage est si répandu. Cela conduit à chauffer le corps noir aux environs de 2.360° K ; cette température est couramment réalisée au cours de recherches qui se poursuivent actuellement sous la direction de M. Chappuis : nous en parlerons plus loin.

Mais on s'est surtout appliqué, jusqu'ici, à déterminer le meilleur mode de construction et d'emploi d'un corps noir au voisinage de la température de couleur équivalente des étalons à filament de carbone (environ 2075°K). L'unité qu'on cherche à définir ainsi se rattacherait aisément à la « bougie internationale » actuelle, puisqu'elle aurait la même couleur.

Ces essais de réalisation d'un « corps noir étalon » ont été entrepris il y a quelques années d'une façon tout à fait indépendante aux États-Unis d'Amérique par Ives (80), et plus récemment par Wensel, Roeser, Barbrow et Caldwell (18, 171), en Allemagne par Müller (122 à 123) et en France par l'auteur du présent ouvrage (33).

2. Le corps noir à température de fusion du platine de Ives. — a) *Principe.* — La difficulté des mesures pyrométriques précises avait conduit Violle, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, à utiliser, pour la détermination de son étalon, une température de changement d'état d'un corps pur convenablement choisi : il était tentant de chercher à appliquer cette méthode au « corps noir ». Dès 1896, Blondel a proposé l'emploi, comme étalon photométrique, d'une enceinte fermée isotherme avec le platine en fusion.

Violle lui-même fit en 1905 (167) quelques expériences à plus haute température : il amenait à l'ébullition, dans un four à arc, un bain d'argent ou de cuivre, et observait le rayonnement émis par une éprouvette en carbone entièrement plongée dans la vapeur métallique. Ces essais ne furent pas poursuivis ; la température réalisée était probablement peu constante ; le point de fusion du platine pur est le seul qui, jusqu'ici, ait paru pouvoir offrir une suffisante précision.

Divers physiciens, notamment Waidner et Burgess (169), ont proposé d'employer une enceinte rayonnante creuse placée dans un bain de métal fondu en train de se solidifier ; mais la température d'un tel système risquait d'être peu uniforme, à cause de sa faible conductibilité calorifique ; et d'autre part, on pouvait redouter une altération du platine, entraînant une variation de son point de fusion (1). Un autre procédé consiste à placer à l'intérieur du « corps noir » un petit fil de platine, intercalé dans un circuit électrique ; la rupture de celui-ci détermine l'instant de la fusion du métal. En opérant ainsi, Brodhun et Hoffmann (19) ont trouvé, pour la brillance du corps noir au point de fusion du platine, la valeur : 65, 24 bougies Hefner par cm², soit 58,7 bougies internationales par cm² (supérieure de 6 0/0 au résultat de Ives indiqué plus loin !). Ici encore une contamination du platine peut intervenir, sous l'action des vapeurs émises par le four ; et le risque d'altération est encore plus grand si, pour assurer l'égalisation des températures, on met le fragment de platine au contact immédiat de l'enceinte.

On pourrait au contraire espérer chauffer le métal jusqu'à son point de fusion tout en le conservant parfaitement pur, en lui donnant la forme d'une lame et en y faisant passer un courant électrique assez intense, comme dans les expériences de Siemens (Voir page 60). C'est ce qu'a fait Ives.

b) *Forme adoptée par Ives pour son « corps noir en platine ».* — Mendenhall, s'inspirant d'une remarque de Féry (59) sur le pouvoir absorbant des cavités coniques, a montré (114) que, si on replie une lame à température uniforme en forme de coin (dièdre) d'angle très aigu, le rayonnement émis par les faces internes dans une direction sensiblement normale à l'arête est assimilable à celui d'un corps noir.

Considérons en effet (fig. 21) une section droite MOP du coin ; soit α l'angle au sommet ; un rayon lumineux tel que SI, après avoir été réfléchi successivement en I et J sur les deux faces du dièdre, a subi une déviation 2α ; après n réflexions (n pair), il aura tourné de l'angle $n\alpha$. Il ne pourra ressortir du coin qu'après avoir tourné d'un angle voisin de π, c'est-à-dire qu'après $n = \frac{\pi}{\alpha}$ réflexions. Soit ρ

(1) Cette méthode a cependant été mise en œuvre récemment au Bureau of Standards (Voir page [illegible]). La même technique a été employée, en même temps que celle décrite ci-après (fusion d'un fil) par *Hoffmann et Meissner* (71), puis par *Fairchild, Hoover et Peters* (47) en vue de comparer les brillances monochromatiques du corps noir aux points de fusion de l'or et du palladium ; mais il s'agissait de températures très inférieures à celle de fusion du platine.

le facteur de réflexion régulière du métal, l'intensité du rayon émergent S' est égale à celle du rayon incident, multipliée par ρ^n. Pour le platine poli, ρ est inférieur à 0,7. Si on prend $\alpha = 10°$, on a $n = 18$ et $\rho^n < 0{,}0016$.

Le coin réalise donc presque exactement un « corps noir », à condition que sa température soit bien uniforme. Mais si ses parois ne sont pas parfaitement polies, une fraction notable de la lumière incidente peut être diffusée vers l'exté-

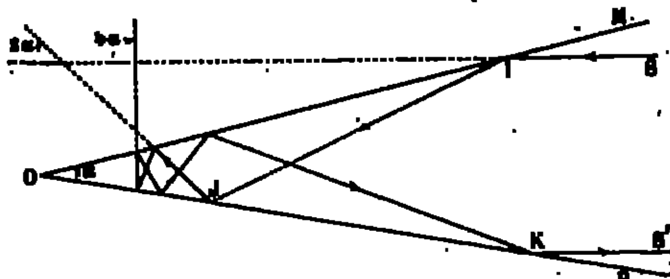


Fig. 21. — Réflexions successives à l'intérieur d'un « coin ».

rieur après une ou deux réflexions seulement; le facteur d'absorption du coin, et par suite aussi le rayonnement émis par lui, seraient alors sensiblement réduits.

Mendenhall détermina (en vue de mesures pyrométriques) la brillance monochromatique d'une lame de platine ainsi repliée. Ives reprit le même dispositif, en échauffant progressivement le coin et observant simultanément sa brillance

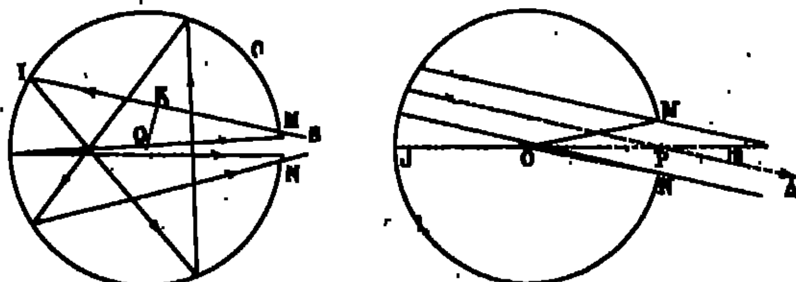


Fig. 22. — Réflexions successives à l'intérieur d'un cylindre.

totale, jusqu'à ce qu'il fonde (83). C'était, en somme, le mode opératoire qu'avait jadis proposé Siemens (146), mais dans lequel on remplaçait le rayonnement propre du platine par celui du « corps noir ».

Ives constata que ces lames en forme de coin se déforment avant la fusion, qu'elles présentent une assez grande différence de température entre les bords et la région voisine de l'arête, et qu'enfin il n'est guère possible de rendre celle-ci parfaitement aiguë : il en résulte qu'un rayon tombant sur elle peut être renvoyé hors du coin, après un très petit nombre de réflexions ; et que par suite, le rayonnement émis est moins intense au voisinage de l'arête qu'ailleurs.

Pour ses expériences définitives (1924) (86), Ives a utilisé une lame de platine poli repliée en forme de cylindre, et présentant une étroite ouverture longitudi-

nale. Soient M et N les projections des deux bords de cette fente sur une section droite C du cylindre (figure 22). Un rayon lumineux pénétrant suivant SI ne ressort qu'après un nombre de réflexions plus ou moins grand, suivant sa distance OK à l'axe, et suivant les dimensions de l'ouverture. La brillance de celle-ci, dans une direction Δ, dépend donc beaucoup de sa largeur angu-



Fig. 23. — Cylindres de platine incandescents (Ives).

laire $\widehat{MON}$, et surtout de l'angle θ que fait Δ avec la droite OP, normale au plan de la fente MN. En particulier, si Δ se confond avec OP, la brillance est minimum, car il en est de même du facteur d'absorption, dans cette direction : un rayon incident POJ ressort du cylindre suivant JOP après une seule réflexion.

Du calcul effectué par Ives (¹), il résulte que, dans le cas du platine poli, à température uniforme, en prenant $\widehat{MON} = 10°$ et $\theta = 8°$, on obtient un rayonnement identique à celui du corps noir (à la même température), à moins de 1/500 près.

La figure 23 montre deux photographies du cylindre incandescent utilisé par

(¹) Ce calcul a été repris et discuté par *Ribaud* et *Nikitine* (140).

Ives : la fente longitudinale y apparaît beaucoup plus brillante que la surface externe, mais quand on l'observe en direction normale ($\theta = 0$), elle présente une bande centrale relativement sombre ; au contraire, pour $\theta = 5°$, elle a une brillance bien uniforme.

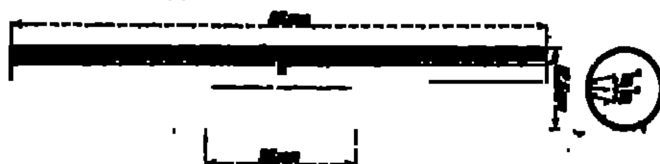


Fig. 24. — Dimensions du cylindre de Ives.

c) *Description de l'appareil de Ives.* — Le platine utilisé fut purifié avec le plus grand soin ; on s'appliqua à éviter toute contamination au cours des fusions et laminages successifs. La proportion d'impuretés, évaluée par des méthodes spec-



Fig. 25. — Appareil de Ives.

troscopiques et thermoélectriques, était assez faible (d'après Ives) pour que le point de fusion ne diffère pas de plus de 0°,3 de celui du métal parfaitement pur ; l'erreur possible correspondante sur la brillance serait inférieure à 1/500.

Les dimensions du cylindre, adoptées après de nombreux essais, sont celles

qu'indique la figure 24. La fente a 25 mm de longueur et 1 mm de largeur ; sa largeur angulaire (vue d'un point de l'axe) est de 9°.

Le platine pur est très mou : pour que le cylindre ne se déforme pas avant de fondre il faut que son épaisseur soit d'au moins 0mm,15 (les feuilles utilisées avaient de 0 mm, 17 à 0 mm, 22). Il faut en outre permettre une libre dilatation du métal, tout en évitant de le soumettre à une traction sensible ; à cet effet, tandis que l'une des extrémités du cylindre est fixe, l'autre est portée par une sorte de levier qu'un contrepoids maintient en équilibre indifférent (figure 25).

Pour assurer l'uniformité de température, l'appareil est protégé contre les courants d'air par une sorte de bouclier ; — l'épaisseur de la feuille de platine



Fig. 26. — Corps noir en platine de Ives avant et après fusion.

est aussi régulière que possible —, enfin, à chacune de ses extrémités, le cylindre est serré sur une tige de platine intérieure (servant de prise de courant) par deux colliers bien ajustés, dont les raccords sont croisés, comme l'indique la figure 26 :

ce dispositif assure une répartition bien uniforme du courant électrique dans la feuille.

La théorie rappelée ci-dessus n'est valable que si le platine est parfaitement poli : s'il diffuse une partie de la lumière incidente, le facteur d'absorption du cylindre, même utilisé sous l'angle le plus favorable, peut en effet devenir très inférieur à l'unité. On doit donc éviter tout « brunissement » au cours du montage de l'appareil; avant d'y faire passer le courant, on le nettoie soigneusement à l'acide azotique, puis à l'eau distillée. L'expérience montre d'ailleurs que le rayonnement du cylindre se modifie progressivement si on le maintient trop longtemps à haute température, parce que la surface du métal devient mate. On n'obtient de bons résultats que si l'échauffement est *très rapide* : les 100 derniers degrés avant la fusion doivent être franchis en moins de 1 minute, ce qui rend les mesures photométriques particulièrement difficiles.

d) ***Mesures photométriques et photoélectriques sur le « corps noir » de Ives*** — Pour comparer la brillance B du « corps noir » à température de fusion de platine à l'intensité des étalons actuels, Ives s'est servi du *dispositif photométrique* indiqué sur la figure 27 : la lentille convergente *l* forme sur un bloc de plâtre P_1 une

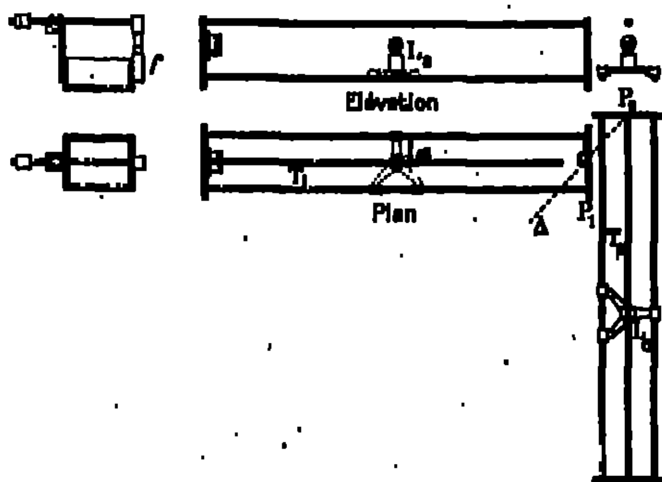


Fig. 27. — Dispositif photométrique de Ives.

image réelle de la fente du cylindre en platine (convenablement orienté) ; un second bloc de plâtre P_2 reçoit d'autre part la lumière d'une lampe tare L_r (d'intensité I_r constante, mais inconnue), mobile sur le banc photométrique T_2. Un système de prismes comportant des bandes réfléchissantes et des bandes transparentes dont certaines sont recouvertes de lames légèrement absorbantes (comme dans le « cube de Lummer » à contrastes) permet à l'observateur, placé dans la direction Δ, de comparer les éclairements des deux blocs de plâtre. On fait passer dans le cylindre un courant alternatif d'intensité progressivement croissante, et on déplace simultanément la lampe L_r de façon que les éclairements de P_1 et P_2 soient

constamment égaux ; leur valeur à l'instant de la fusion est $E = \frac{I_c}{d_2^2}$ (d_2 étant la distance de L_c à P_2 à cet instant).

On a d'autre part $E = kB$, k étant une constante que l'on sait calculer, si l'on a déterminé par des mesures auxiliaires le facteur de transmission de la lentille l, sa surface, ainsi que ses distances à la fente f et au plan P_1.

On éclaire ensuite le bloc de plâtre P_1 non plus par le « corps noir », mais par une lampe étalon secondaire à filament de carbone L_s d'intensité connue I_s (bougies internationales) placée sur le banc photométrique T_1 ; soient d'_1 et d'_2 les distances respectives des lampes L_s et L_c aux plans P_1 et P_2 lorsque l'équilibre photométrique est réalisé ; on a : $\frac{I_s}{d_1'^2} = \frac{I_c}{d_2'^2}$.

(On fait en réalité plusieurs expériences successives, avec divers étalons secondaires récemment comparés à l'étalon primaire actuel, et placés à une même distance d'_1, et on prend la moyenne des valeurs trouvées pour d'_2).

En éliminant entre les trois équations ci-dessus les inconnues E et I_c, on obtient $B = \frac{I_s}{k}\left(\frac{d'_2}{d'_1 d_2}\right)^2$.

La couleur du corps noir au point de fusion du platine est assez voisine de celle des étalons à filament de carbone (cette dernière est toutefois un peu plus blanche) ; les comparaisons photométriques peuvent donc, par le choix d'une lampe tare convenable, être rendues presque homochromes. Elles restent cependant très délicates, parce qu'elles portent sur une source dont l'intensité augmente

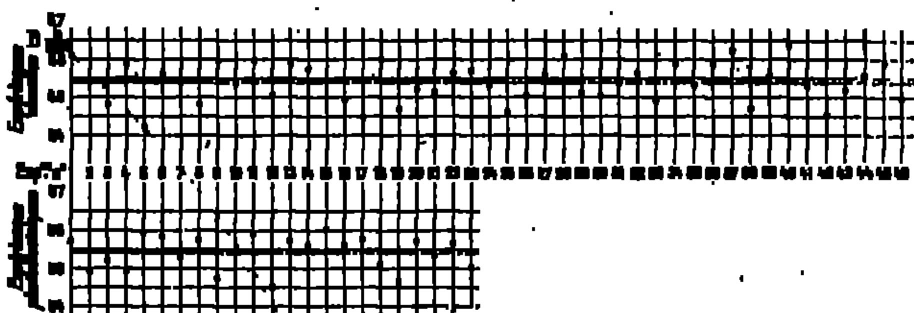


Fig 28.

très rapidement, puis tombe brusquement à zéro au moment de la rupture de la feuille de platine. La vitesse d'échauffement de 100° par minute, indiquée ci-dessus, correspond, pour le corps noir aux températures voisines de 2050° K (¹), à une variation relative de brillance de *1 0/0 par seconde* (voir le tableau X, p 66). Aussi paraît-il bien difficile de repérer avec exactitude

(¹) La température de fusion du platine est d'après les plus récentes mesures, 2.046° K (Voir note au bas de la page [illegible]). Ives a admis 2077°K ; nous avons vu, d'ailleurs, que la connaissance précise de cette température n'est pas nécessaire pour la réalisation de l'étalon.

la position pour laquelle la lampe tare L donne, sur l'écran photométrique, le même éclairement que le corps noir *à l'instant précis de sa fusion*.

Pour éliminer dans une certaine mesure « l'équation personnelle considérable » que comporte cette « méthode d'approche », Ives effectue d'une manière analogue la comparaison de la lampe étalon avec la lampe tare. A cet effet, on déplace la lampe L_e sur le banc T_1, avec une vitesse telle que l'éclairement du plan P_1 augmente à peu près de la même façon qu'au cours de l'expérience portant sur le corps noir ; on déplace simultanément la lampe tare de façon à maintenir l'équilibre photométrique, jusqu'à l'instant où, la distance de l'étalon à l'écran P se trouvant réduite à la valeur d_1, sa lumière est brusquement interceptée par un écran opaque, dont un contact électrique provoque la chute.

Bien que cette méthode semble d'une application très délicate, elle a donné à Ives des résultats très concordants. Le tableau XI et la figure 28 indiquent les valeurs obtenues au cours de ses expériences finales qui comportèrent 46 fusions successives. (Le platine employé provenait de deux origines différentes).

La moyenne des valeurs trouvées pour B fut 55,30 b/cm², l'écart relatif maximum et l'écart moyen d'une mesure par rapport à la moyenne étant respectivement de 2,02 0/0 et de 0,72 0/0.

TABLEAU XI. — BRILLANCE DU CORPS NOIR AU POINT DE FUSION DU PLATINE, D'APRÈS LES MESURES DE IVES

Mesures visuelles				Mesures photoélectriques	
Expérience n°	Résultat (b/cm²)	Expérience n°	Résultat (b/cm²)	Expérience n°	Résultat (b/cm²)
—	—	—	—	—	—
1	56,11	24	55,35	1	55,72
2	55,40	25	54,67	2	54,91
3	54,82	23	55,06	3	55,21
4	55,89	24	55,60	4	54,91
5	54,27	28	56,11	5	55,92
6	55,62	29	55,16	6	55,82
7	55,39	30	55,04	7	55,31
8	54,81	31	55,38	8	55,77
9	55,98	32	55,65	9	54,76
10	55,34	33	54,91	10	55,46
11	55,98	34	55,84	11	55,92
12	55,04	35	55,35	12	54,50
13	55,87	36	55,85	13	55,72
14	55,77	37	56,23	14	55,60
15	55,47	38	54,69	15	56,07
16	54,97	39	55,53	16	55,62
17	54,50	40	56,35	17	55,77
18	56,01	41	55,30	18	55,11
19	54,70	42	54,56	19	54,66
20	55,22	43	55,15	20	55,72
21	55,17	44	55,55	21	55,36
22	55,66	45	55,90	22	55,67
23	55,72	46	54,98	23	55,01
	Moyenne : 55,30 b/cm²				Moyenne : 55,41 b/cm²

Les difficultés de cette « méthode visuelle » ont d'ailleurs amené Ives à la con-

trôler par une méthode purement physique, permettant d'enregistrer d'une fa
continue les variations de la brillance du corps noir jusqu'à l'instant de la fus
On utilise à cet effet une *cellule photoélectrique* (¹) (au potassium dans une at
sphère d'argon à faible pression), que l'on dispose à l'intérieur d'une boîte opa
percée d'une ouverture, à la place qu'occupe l'écran P_1 dans les expérie
visuelles. On sait qu'une telle cellule, reliée à une source de force électromot
constante, débite un courant dont l'intensité i est une fonction croissante (s
vent presque linéaire) de son éclairement. Ce récepteur radiométrique est d'
leurs extrêmement sélectif, c'est-à-dire que, à égalité de flux d'énergie, le c
rant i varie beaucoup avec la composition spectrale du rayonnement reçu.

Ives associe à une cellule spécialement choisie un écran jaune (à la tartrazi
tel que la courbe de sensibilité spectrale de ce système présente, comme celle
l'œil, un maximum pour 0μ,55. Ces deux courbes ne sont toutefois pas identiq
et par suite la cellule ne donne pas rigoureusement les mêmes résultats que l'obs
vation visuelle ; mais l'erreur qui en résulte, dans le cas envisagé, est négligeal
parce que les rayonnements des deux sources à comparer ont des compositi
spectrales assez voisines.

On forme donc sur l'ouverture de la boîte qui contient la cellule une im
réelle de la fente du corps noir (de brillance B) ; puis on éclaire cette ouvert
par une lampe étalon à filament de carbone, d'intensité I, placée à une distance
Soient i et i' les valeurs de l'intensité du courant traversant la cellule au cours
ces deux expériences; si $i = i'$, on a $kB = \frac{I}{d^2}$, le facteur k étant calculé
comme nous l'avons dit page 48. En général, i diffère quelque peu de i' ;
utilise alors une méthode d'interpolation (en donnant successivement à d diver
valeurs convenables).

Les intensités i et i' sont très faibles — de l'ordre de 10^{-10} ampère ; on
mesure à l'aide d'un électromètre sensible, relié aux bornes d'un conducteur
très grande résistance (mélange de xylol et d'alcool, en tube scellé ; environ
ohms) placé lui-même en série avec la cellule et la batterie d'accumulat
(90 volts). L'appareil est étalonné, à de fréquents intervalles, à l'aide d'un pot
tiomètre.

Les variations d'éclairement étant rapides, il faut un récepteur ayant
d'inertie, ce qui est bien le cas des cellules photoélectriques ; quant à l'élect
mètre à corde employé, il prend (à partir du repos) sa position d'équilibre
moins de 1 seconde ; 96 0/0 de la déviation sont acquis en moins de $0^s,1$, et
faibles variations d'intensité sont sans doute enregistrées plus rapidement enco

(¹) Sur la théorie et les conditions d'emploi des cellules photoélectriques en photométrie p
sique, voir l'ouvrage de *Dunoyer* : Photométrie par effets électriques, à paraître dans cette
lection.

Ives signale pourtant que, si on utilise, suivant la « méthode d'approche » indiquée plus haut, une lampe que l'on déplace lentement, puis dont on masque brusquement la lumière par un écran, la déviation maximum de l'électromètre est inférieure de 1/2 0/0 à celle qu'il indiquerait si la même lampe était maintenue immobile (et non masquée) dans sa position finale.

La rapide variation de brillance du corps noir en platine (due à ce qu'on est obligé de le chauffer très rapidement) comporte donc, pour la méthode photoélectrique aussi bien que pour la méthode visuelle, un assez gros risque d'erreur. Ives considère que, dans les deux cas, l'emploi de sa « méthode d'approche » diminue beaucoup ce risque.

Les déviations du spot de l'électromètre sont de l'ordre de *2 cm au plus* à 1 mètre de distance. On les enregistre sur une feuille de papier photographique : après développement, on les mesure à l'aide d'un microscope micrométrique avec une précision qui, d'après Ives, atteindrait 1/1000.

Nous avons reporté sur le tableau XI et la figure 28 les résultats obtenus par Ives à l'aide de cette méthode photoélectrique, au cours de 28 fusions successives ; la valeur moyenne trouvée pour B fut 55,40 b/cm², l'écart moyen par rapport à la moyenne étant de 0,69 0/0.

De l'ensemble de ces 69 mesures, tant visuelles que photoélectriques, Ives conclut que la brillance du corps noir, au point de fusion du platine, est

$$B = 55{,}40 \pm 0{,}11 \ b/\text{cm}^2,$$

admettant ainsi que l'étalon qu'il proposait était reproductible à 1 /500 près. Cette évaluation peut sembler optimiste, si l'on tient compte des erreurs possibles sur les diverses mesures auxiliaires (facteur de transmission et grandissement linéaire de la lentille qui sert à former une image du corps rayonnant sur le photomètre ou sur la cellule, dimensions du diaphragme limitant la surface utile de cette lentille, etc.), et surtout si l'on songe à la nécessité d'échauffer rapidement le cylindre de platine pour qu'il reste assimilable à un corps noir : une telle précision impliquerait, en effet, que la mesure photométrique a été réalisée *au cours du dernier cinquième de seconde* avant la fusion !

Il a fallu toute l'habileté expérimentale de l'auteur pour obtenir les résultats bien concordants que nous avons indiqués ci-dessus ; il déclarait lui-même que seules des expériences ultérieures permettraient de contrôler la reproductibilité de son étalon, et aussi de mettre en évidence des différences éventuelles entre le radiateur ainsi réalisé et le « corps noir théorique, à température de fusion du platine » (¹). Mais ces expériences ne semblent pas avoir été poursuivies.

(¹) *Ribaud et Nikitine* (140), puis *Ribaud et Mohr* (140 *bis*) ont appliqué récemment la méthode du tube à la réalisation de corps noirs aux points de fusion du palladium et du platine destinés à servir d'étalons *pyrométriques*. Les dimensions de leurs appareils sont beaucoup plus petites que celles des tubes de Ives, ce qui permet d'éliminer l'influence du dépolissage superficiel du métal, et rend les mesures plus précises.

Des méthodes très différentes de celle de Ives ont d'ailleurs pu être mises en œuvre pour la réalisation d'un « corps noir étalon » ; nous allons maintenant les étudier.

3. Corps noir étalon : sa réalisation à l'aide d'un four à tube de carbone. — a) *Choix du mode de chauffage.* — On sait que, pour effectuer une mesure photométrique soignée, il convient de prendre la moyenne d'un assez grand nombre de « pointés » successifs : d'où la nécessité de maintenir constante, pendant quelques minutes au moins, l'intensité du « corps noir » destiné à servir d'étalon. Ce résultat n'a pu être obtenu, jusqu'ici, qu'au moyen de *fours électriques* réglés avec le plus grand soin. Le premier « corps noir » chauffé électriquement fut réalisé en 1901 par Lummer et Kurlbaum à l'aide d'un *four à résistance de platine* (111) ; diverses modifications y ont été apportées par Waidner et Burgess (169), par W.-W. Coblentz (21) et par Hoffmann et Meissner (71) en vue d'obtenir une température plus uniforme [1].

Pour dépasser le point de fusion du platine, Nernst (124), Waidner et Burgess (169), Hoffmann (16, 76) ont utilisé des fours à résistance de platine iridié ou à *tube d'iridium* ; mais ce dernier métal (d'ailleurs très coûteux) s'altère rapidement à haute température. Des essais sur des fours à spirale de tungstène ou de molybdène dans le vide ont été entravés par la difficulté de trouver un support suffisamment réfractaire et n'attaquant pas le métal (52).

Il est au contraire facile d'obtenir des températures très élevées en faisant passer un courant électrique intense dans un *tube de carbone* convenablement protégé. C'est un four de ce genre qu'ont utilisé, pour leurs mesures sur le corps noir, Lummer et Pringsheim (112), puis Hyde, Forsythe et Cady [2] (77), sans toutefois s'appliquer à réaliser des températures très uniformes ni surtout très constantes.

Beaucoup de fours à résistance de carbone s'usent assez rapidement, parce qu'ils sont mal protégés contre l'oxydation ; on évite ce risque en les plaçant dans le vide [3], mais leur montage est alors assez délicat, la calorifugation bien moins bonne, et par suite la puissance consommée relativement grande. Il peut arriver, d'autre part, que les prises de courant, mal ajustées, présentent un échauffement excessif ; souvent enfin, le tube chauffant, fixé à une monture rigide, se trouve soumis, par suite des différences de dilatation ou de contraction, à des efforts mécaniques qui provoquent sa rupture.

Pour des recherches en cours (dont nous parlerons plus loin), Müller (121) utilise un four à tube de carbone dans le vide, de grandes dimensions, spécialement

---

[1] Sans avoir à recourir aux mémoires originaux, on trouvera des détails sur ces divers fours et sur ceux dont nous parlons plus loin, dans l'ouvrage « Fours électriques et Chimie » que nous avons déjà cité page 52.

[2] Ces auteurs se sont servis d'un four à tube de carbone dans le vide construit antérieurement par *Forsythe* (57).

[3] L'appareil doit être relié en permanence avec la pompe à vide, car les gaz occlus dans le charbon se dégagent pendant de longues heures, à haute température.

construit par la Société Osram. L'une des extrémités du tube chauffant comporte plusieurs fentes longitudinales, ce qui lui donne une certaine élasticité; elle glisse librement à l'intérieur d'une électrode tubulaire en cuivre argenté, refroidie; des ressorts en acier spécial assurent un bon contact électrique entre le tube de carbone et l'électrode. Müller n'a pas indiqué les dimensions de ce four, ni celles du « corps noir » disposé à l'intérieur, non plus que le degré de constance des températures qu'il y réalise.

Nous avons nous-même construit et utilisé (86) un « corps noir à tube de carbone » peu coûteux, d'un montage facile, ayant une faible consommation de puissance et dont l'usure est extrêmement lente, ce qui permet d'y maintenir des températures remarquablement constantes. Nous allons indiquer rapidement comment on peut le construire, le régler, contrôler la constance de sa température et évaluer l'écart possible entre son rayonnement et celui du « corps noir » théorique.

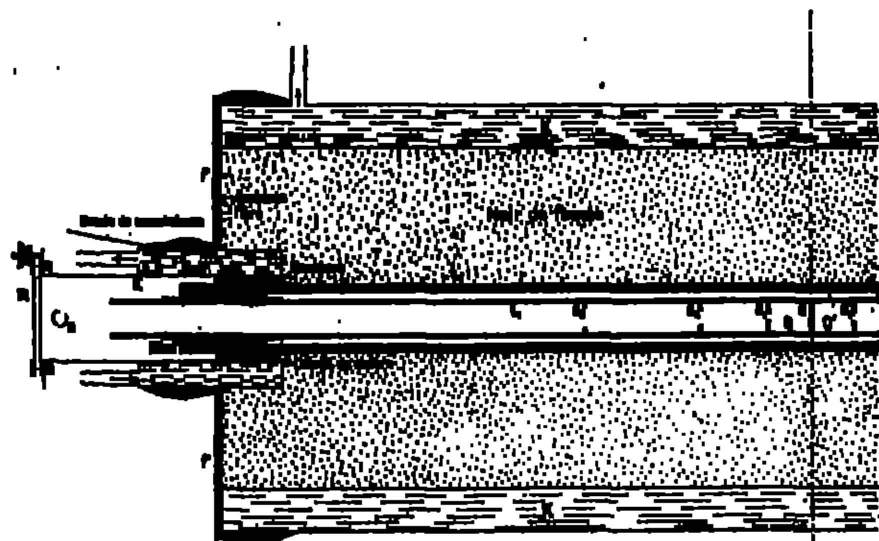


Fig. 29. — Corps noir à tube de carbone (P. Fleury). Coupe (partie avant).

b) *Description et réglage de notre four à tube de carbone.* — Le tube chauffant *t* (figures 29 et 30), en carbone amorphe, a 720 mm de longueur, 30 mm de diamètre intérieur et 40 mm de diamètre extérieur. Ses extrémités, encuivrées par électrolyse, sont soudées dans des électrodes tubulaires E, E' en cuivre rouge, auxquelles le courant est amené par de gros câbles souples.

Des flasques *f*, *f'* maintiennent le tube *t* dans l'axe d'un double cylindre de zinc K (diamètre intérieur : 20 cm, extérieur : 25 cm) formant « chemise d'eau ». L'espace entre *t* et K est rempli de noir de fumée préalablement desséché, criblé et modérément tassé. L'isolement électrique entre chaque flasque et l'électrode

correspondante (et aussi, pour plus de sûreté, entre les flasques et la « chemise d'eau ») est assuré par des cales en fibre. Une bande de caoutchouc (feuille anglaise) recouvre tous les joints non soudés.

La souplesse de la monture ainsi réalisée favorise la bonne conservation du four ; le tube de carbone, en effet, se dilate de plus de 6 mm pendant le chauffage : il se briserait si on le soumettait à un effort mécanique même faible.

Aux extrémités des électrodes E sont soudés des anneaux plats a sur lesquels on applique (en interposant des rondelles de caoutchouc) les bords d'une lame à faces parallèles en quartz R. Le four est ainsi *complètement* clos.

On y fait circuler, par les tubulures s, un lent *courant d'azote* (bien privé d'oxy-

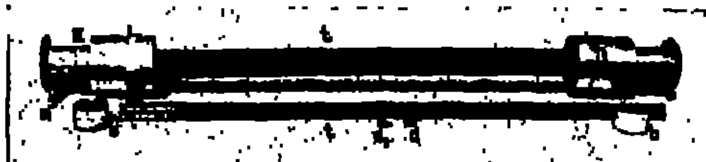


Fig. 20. — Corps noir à tube de carbone (P. Fleury).
Tube chauffant t muni de ses électrodes ; tube latéral b avec diaphragmes.

gène par passage sur une colonne de tournure de cuivre chauffée au rouge, et parfaitement desséché), pour chasser au besoin l'oxygène et pour entraîner les fumées qui se produisent au cours des premiers chauffages. Un courant d'eau à débit constant passe dans les électrodes E (pour empêcher la fusion de la soudure qui les unit au tube t), ainsi que dans la « chemise » K : la constance de la température de celle-ci facilite le réglage du four.

Malgré le refroidissement ainsi produit, la puissance consommée est relativement faible (375 watts à 1 330°K ; 815 watts à 2 060°K ; 1 110 watts à 2 350°K).

La *résistance* du four est, à 2 000°K, réduite aux 6/10 de sa valeur à froid. Celle-ci, qui avant tout chauffage était d'environ 0 ω,060, tomba à 0 ω,041 après que le four eût été porté quelques heures à plus de 2 000°K (et quelques minutes à plus de 2 300°K). Les chauffages ultérieurs l'ont fait augmenter très régulièrement jusqu'à 0 ω,10.

Ce fait correspond sans doute à une usure progressive du tube de carbone, mais celle-ci est certainement très lente : après plus de 50 allumages (d'une durée totale de 300 heures environ, dont au moins 150 à plus de 2 050° K), on pouvait encore maintenir dans le four une température extrêmement constante, comme nous allons l'indiquer. Il consommait à ce moment :

À 2 050° K, 115 ampères sous 7,1 volts ;

À 2 350° K, 136 ampères sous 8,1 volts [1].

---

[1] M. *Chappuis* (20) utilise actuellement, pour les mêmes recherches, un tube chauffant un peu plus gros : 54mm de diamètre extérieur, 1mm d'épaisseur, possédant une plus grande inertie

Le courant nécessaire provient d'un transformateur, relié soit au réseau de distribution de la ville, soit (lorsqu'on veut régler avec précision la puissance consommée) à une dynamo fonctionnant en commutatrice, et alimentée elle-même par des accumulateurs.

Pour effectuer les *réglages*, on agit sur des rhéostats disposés dans le circuit primaire du transformateur (fig. 31) : si le four est trop froid, on lui applique une puissance notablement supérieure à celle qui correspond au régime voulu. C'est ainsi que, en partant de la température ordinaire, on atteint 1 800° C en 1 heure avec environ 1 000 watts. Quand la température cherchée est dépassée, on affaiblit le courant, jusqu'à ce que le four soit de nouveau un peu trop froid, et ainsi de

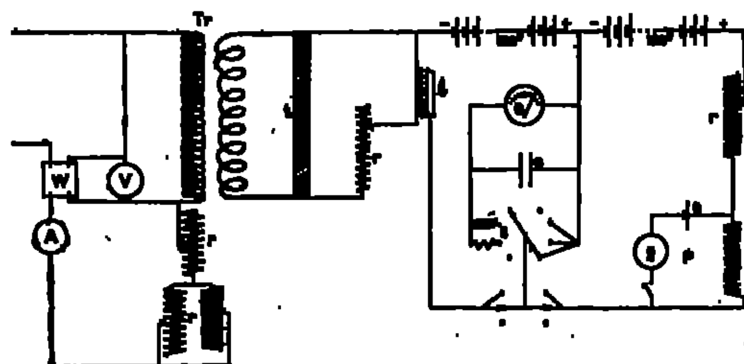


Fig. 31. — Appareils de mesure et de réglage de la puissance consommée dans le four à tube de carbone (P. Fleury).

t, tube de carbone ; Tr, transformateur ; *r*, rhéostats ; A, ampèremètre ; V, voltmètre ; W, wattmètre ; *L*, lampe à 3 électrodes ; P, potentiomètre pour la mesure du courant continu opposé au courant de plaque ; *e*, pile étalon ; *g*, galvanomètre ; G, microampèremètre ; *s*, shunt réglable de G ; *c*, condensateur de 10 microfarads.

suite, en diminuant progressivement l'amplitude des variations de puissance.

La vitesse d'échauffement ou de refroidissement ne met chaque fois que quelques secondes à prendre sa nouvelle valeur, ce qui permet d'arriver assez rapidement à l'équilibre. Quand l'ensemble du four a à peu près atteint l'état de régime thermique — quand, par exemple, la région centrale est depuis 1 heure aux environs de la même température (à 20° près) —, celle-ci se maintient parfaitement constante, pourvu qu'il en soit de même de la puissance dépensée.

Il faut, pour faire ce réglage, mesurer les variations de puissance avec une très grande précision, ce qui est d'autant plus difficile que le courant employé est alternatif. Quand notre wattmètre n'est pas assez sensible, nous utilisons la méthode suivante, basée sur la croissance très rapide du rayonnement thermoïonique en fonction de la température : nous plaçons en dérivation sur le four (avec

calorifique, et par suite une plus grande stabilité ; la puissance consommée est 2,5 Kw à 2 073° K et 3 Kw à 2 360° K.

interposition d'une résistance convenable) le filament d'une lampe à trois électrodes, dont la grille et la plaque (en parallèle) sont portées à un potentiel bien constant, soit 120 volts (fig. 31).

Quand la tension efficace aux bornes du four diminue légèrement (par exemple), il en est de même de la température maximum qu'atteint le filament à chaque alternance du courant, et le flux d'électrons émis décroît sensiblement ; l'expérience montre que les variations relatives d'amplitude de la tension sont reproduites très amplifiées (décuplées, par exemple) par des variations relatives du courant de plaque. Ce dernier étant toujours de même sens, on peut l'opposer à un courant continu constant, dans un microampèremètre (à plusieurs sensibilités) que l'on shunte par un condensateur pour amortir les ondulations du courant de plaque.

On peut ainsi mesurer les variations de celui-ci (qui est de l'ordre de 5 milliampères) à 2 μA près, ce qui correspond pour le four à des écarts de puissance inférieurs à 0 watt, 1 (sur 800 watts) et, quand l'équilibre thermique est atteint, à des changements de température inférieurs à 0°,1 (autour de 2075°K).

c) *Forme et dimensions du « corps noir »* — Le « corps noir » dont nous nous sommes servi est une enceinte cylindrique en carbone placée dans la région la plus chaude du four précédent. L'une de ses bases est percée en son centre d'une petite ouverture ayant environ 20 mm², et dont l'intensité lumineuse (au-dessus de 2050°K) est par suite supérieure à 10 bougies, c'est-à-dire suffisante pour se prêter à des mesures précises.

Les dimensions linéaires de l'enceinte sont de l'ordre de 2 cm., donc relativement grandes vis-à-vis de celles de l'ouverture et cependant assez réduites pour qu'on y puisse réaliser une température bien uniforme.

Nous avons adopté le montage suivant : aux extrémités du tube chauffant t (fig. 30) sont placées des cales cylindriques b b' en aluminium soutenant un second tube de carbone t_1, de 18 mm de diamètre intérieur et 2 mm d'épaisseur, de telle façon qu'il ait même axe que le premier (dont il est d'ailleurs isolé électriquement par des lames de mica).

Ce tube t_1 porte vers le milieu de sa longueur un diaphragme plein d ; à 28 mm en avant de celui-ci (du côté du photomètre), un second disque d_1, percé en son centre d'un trou de 5 mm de diamètre, limite, avec le précédent et la paroi de t_1, la région (C) utilisée comme « corps noir ».

D'autres diaphragmes d_2, d_3, d'_1, d'_2, d'_3, percés de trous convenables, limitent les pertes de chaleur par rayonnement. Ce sont, comme les premiers, des lames de carbone de 2 mm d'épaisseur que l'on glisse dans des fentes pratiquées sur la moitié d'une section droite du tube t_1 (fig. 31) (1).

Le dispositif précédent semble devoir assurer une bonne uniformité de tempé-

(1) M. *Chappuis* utilise actuellement un tube t_1, de même forme, mais constitué par divers tronçons en graphite vissés les uns sur les autres, et formant avec les diaphragmes un ensemble rigide.

rature L'emploi d'un tube chauffant en carbone est favorable, à ce point de vue, car sa résistance électrique diminue quand la température augmente : la densité du courant étant la même tout le long du tube, c'est dans la région la plus froide que le dégagement de chaleur est le plus grand.

D'autre part, le cylindre intérieur t_1, étant isolé électriquement du tube chauffant, ne produit pas de perturbations des lignes de courant, comme l'auraient fait des diaphragmes posés directement dans la région centrale du four. Des mesures faites au couple thermoélectrique vers 1400° K ont d'ailleurs montré que la présence de t_1 augmente l'uniformité de température le long de l'axe, sans doute parce qu'il est moins refroidi à ses extrémités que le tube t lui-même.

L'amplitude des écarts de température possibles à l'intérieur du corps noir (C), à 2075° K environ, sera discutée plus loin.

d) *Constance de la température.* — Pour la contrôler, nous avons utilisé la variation très rapide du rayonnement total $\mathcal{R}$ du corps noir en fonction de sa température absolue T.

(D'après la loi de Stefan, $\frac{d\mathcal{R}}{\mathcal{R}} = 4\frac{dT}{T}$: un écart de température de 1° aux environs de 2 000° K fait donc varier $\mathcal{R}$ de 1/500).

Celle des extrémités du four qui ne se trouve pas éclairée par le corps noir (C) est fermée, non par une lame à faces parallèles, mais par une lentille de quartz, qui forme de l'ouverture du disque d_1 une image réelle sur laquelle on pointe un télescope pyrométrique Féry.

Cet appareil permet de contrôler la constance du rayonnement émis par le corps noir (C') — symétrique de (C) par rapport à d — d'où l'on déduit celle de la température du radiateur (C). On mesure pour cela la force électromotrice e du pyromètre (qui est de l'ordre de 1 millivolt), en lui opposant une tension connue ε, à l'aide d'un potentiomètre. On ne s'astreint d'ailleurs pas à équilibrer constamment celui-ci, on observe la déviation α du spot de son galvanomètre sur une échelle graduée : α est sensiblement proportionnelle à $e - \varepsilon$ quand cette quantité est petite.

Comme on le verra plus loin, il est possible de maintenir α constant, pendant une demi-heure au besoin, à $\pm$ 1 mm près, ce qui, dans les conditions de l'expérience, correspond à une variation de température du corps noir inférieure à $\pm$ 0°,13 (aux environs de 2 075° K), et à une variation relative de sa brillance inférieure à $\pm$ 6/10 000.

e) *Différences entre le radiateur que nous venons de décrire et le « corps noir » théorique.* — Le rayonnement de l'enceinte que nous avons employée ne serait identique à celui d'une surface parfaitement absorbante (corps noir) que si son ouverture était infiniment petite, et sa température rigoureusement uniforme.

Ces conditions ne sont pas parfaitement remplies ; on peut, par un raisonnement simple, déterminer une limite supérieure de l'erreur qui en résulte.

L'enceinte est, nous l'avons dit, un cylindre en carbone de 20 mm de diamètre intérieur et 25 mm de longueur, percé, au centre d'une de ses bases, d'une ouverture de 5 mm de diamètre. Les rayons utilisés proviennent uniquement de points situés sur l'autre base, au voisinage de son centre. Supposons qu'un flux lumineux F provenant de l'extérieur de l'enceinte tombe sur un élément E, de surface s, de cette région. Admettons que les parois absorbent la fraction a des flux qu'elles reçoivent, et diffusent le reste suivant la loi de Lambert, la réflexion spéculaire étant supposée nulle. Posons : $\delta = 1 - a$.

Soit σ l'aire de l'ouverture, et D sa distance à l'élément E ; la brillance de celui-ci, qui diffuse un flux $F\delta$, est $\frac{F\delta}{\pi s}$. Il renvoie vers l'ouverture le flux

$$\frac{F\delta}{\pi}\frac{\sigma}{D^2} = F\delta\varepsilon, \qquad \left(\varepsilon = \frac{1}{\pi}\frac{\sigma}{D^2} = \frac{1}{100}\right).$$

Le reste $F\delta(1-\varepsilon)$ tombe sur la paroi de l'enceinte, qui n'en renvoie vers l'ouverture qu'une fraction inférieure à $\delta\varepsilon$. Si δ est petit, on peut négliger la portion du flux qui ressort après plus de deux réflexions.

Si on appelle A le pouvoir absorbant de l'enceinte (utilisée dans les conditions indiquées), on a donc :

$$1 - A < \delta\varepsilon + \delta^2\varepsilon < \frac{1,7}{1000},$$

en admettant que le pouvoir émissif du carbone à haute température est, dans le spectre visible, au moins égal à 0,85 $\left(\text{d'où } \delta < \frac{15}{100}\right)$.

D'après la loi de Kirchhoff, A est le rapport des brillances B′ et B du radiateur considéré et du corps noir ayant la même température. On a donc :

$$\frac{B - B'}{B} < \frac{1,7}{1000}.$$

Étudions maintenant l'influence des inégalités de température. Remarquons d'abord que, si l'enceinte C est isotherme, sur un flux lumineux unité qui sort en partant de l'élément E considéré plus haut, la fraction a a été émise par cet élément, et le complément δ provient (après une ou plusieurs réflexions) du reste de l'enceinte.

Admettons maintenant que celle-ci est tout entière à la température $T + dT$, sauf l'élément E qui est à T. (Si dT est en fait l'écart maximum de température entre E et un point quelconque de la paroi, le calcul que nous allons faire fournira une limite supérieure des erreurs dues au manque d'isothermie). dT est probablement positif, puisque l'élément E rayonne beaucoup plus d'énergie que le reste de l'enceinte.

Les mesures photométriques donnent, au lieu de la brillance cherchée $B = f(T)$, le résultat :

$$B' = \alpha f(T) + \beta f(T + dT) = B + \beta \frac{df}{dT} dT.$$

D'où :

$$\frac{B' - B}{B} = \beta \frac{f'(T)}{f(T)} dT < \frac{0,9}{1000} dT$$

si on admet

$$\beta < \frac{15}{100} \qquad \text{et} \qquad \frac{f'}{f} = 0,006 \text{ (}^1\text{)}.$$

Nous n'avons pu déterminer expérimentalement une limite supérieure de Td. Remarquons toutefois que l'ouverture du cylindre n'est pas visible, au milieu de sa paroi avant (même si l'on observe à travers un écran bleu foncé) : la température de celle-ci ne diffère donc probablement pas de celle du fond de plus de 1 à 2°.

D'ailleurs, à cause des diaphragmes disposés en avant de l'enceinte (C), celle-ci ne rayonne qu'en direction presque normale, dans un angle solide inférieur au double de l'angle utile. $\frac{\sigma}{D^2} = \omega$, et la puissance correspondante est d'environ

$$W = \frac{5,7\ 10^{-12}}{\pi} \frac{2\sigma}{D^2} T^4 = 0^w,2.$$

Or, l'application de la loi de Stefan montre que l'élément E, de surface $s = \sigma$, à la température T, recevrait par rayonnement, du reste de l'enceinte supposé à la température $T + dT$, la puissance

$$W' = 4 \times 5,7\ 10^{-12}\ T^3 dT = 0,2\ dT \text{ watts}.$$

D'autre part, d'après Worthing (²), le coefficient de conductibilité calorifique du carbone amorphe à 2000° est environ 0,75 watt/cm. degré : à une chute de température dT, entre les extrémités d'un conducteur de 2 cm de longueur et 60 mm² de section, correspond une puissance transportée :

$$W'' = 0,75 \times \frac{0,6}{2} dT = 0,2\ dT \text{ watts}.$$

Pour que les apports d'énergie par rayonnement et par conduction compensent les pertes subies par l'élément E, il suffit donc que dT soit de l'ordre de 1°.

En admettant 2° pour limite supérieure de dT, on aura :

$$\frac{B' - B}{B} < \frac{1,8}{1000}.$$

Comme les erreurs sur B, tenant aux deux causes que nous venons de consi-

(¹) Voir le tableau X, dernière colonne.
(²) *Worthing*, Phys. Rev., 12, 199 (1918)

dérer, doivent avoir des signes opposés, on peut admettre que la brillance de notre radiateur diffère de moins de 2/1000 de celle d'un corps noir parfait.

4. Détermination de la température du « corps noir étalon ». — a) *Nécessité de recourir aux méthodes de la pyrométrie optique.* — Le « corps noir » que nous venons de décrire paraît susceptible, grâce à sa température bien constante, de constituer un bon étalon photométrique — à condition toutefois qu'on puisse fixer cette température avec une suffisante précision : aux environs de 2 075°K, la variation relative de brillance est d'environ $\frac{5,75}{1000}$ par degré, comme l'indique le tableau de la page X.

Les possibilités d'emploi du point de fusion ou d'ébullition d'un corps pur pour repérer la température du « corps noir » ont été discutées au paragraphe 2. D'autre part, au-dessus de 2 000°K, on ne dispose pas de couples thermoélectriques stables (¹). Les méthodes de la pyrométrie optique (²) restent alors les seules à envisager ; elles sont basées sur la mesure de la brillance (énergétique totale ou monochromatique) du corps étudié : s'il s'agit d'un corps noir, la brillance énergétique est liée à la température par les lois de Stefan et de Planck que nous avons rappelées au début de ce chapitre.

La vérification de ces lois et surtout l'évaluation des constantes numériques qui y interviennent présentent de grosses difficultés ; la précision des mesures de pyrométrie optique est par suite assez limitée. Heureusement, il n'est pas indispensable de connaître avec exactitude, dans l'échelle thermodynamique, la température du « corps noir étalon » : il suffit de pouvoir la repérer et la reproduire à une fraction de degré près. Nous avons utilisé à cet effet une méthode que nous allons décrire ; nous indiquerons ensuite divers autres procédés qui ont fait l'objet d'études plus ou moins poussées.

b) *Utilisation du rayonnement monochromatique.* — La plupart des déterminations pyrométriques sur le corps noir, au-dessus de 2 000°K, ont été faites, jusqu'ici, en mesurant sa brillance spectrale b_λ (pour une longueur d'onde connue λ), et en calculant sa température absolue T à l'aide de la loi de Planck (voir page 65).

$$b_\lambda = \frac{k}{\pi} \lambda^{-5}\left(e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1\right)^{-1}.$$

Dans toute l'étendue du spectre visible, et pour des températures inférieures à 2 500°K, on peut sans erreur appréciable remplacer cette formule par la suivante, qui a été indiquée antérieurement par Wien :

$$b_\lambda = \frac{k}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{c}{\lambda T}}.$$

(¹) Brodhun et Hoffmann (46) ont pu toutefois utiliser jusqu'au point de fusion du platine des couples iridium-iridium ruthénié ou iridium rhodié.

(²) Les principes et la technique de la *pyrométrie optique* sont exposés en détail par *G. Ribaud* dans un autre ouvrage de cette collection.

Le coefficient k n'est pas connu avec une très grande précision, et les mesures absolues sont difficiles. Aussi prend-on comme terme de comparaison la brillance b_{λ_0} du corps noir à une température connue T_0 choisie parmi les plus élevées que l'on ait déterminées avec précision au moyen du thermomètre à gaz ; on utilise généralement le point de fusion de l'or $T_0 = 1\,336°K$.

De la formule de Wien, on tire :

$$\frac{b_\lambda}{b_{\lambda_0}} = e^{\frac{c}{\lambda}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)},$$

d'où

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{C} \text{ log nép } \frac{b_\lambda}{b_{\lambda_0}}. \qquad (1)$$

C'est cette méthode qu'ont employée, en particulier, Hyde, Forsythe et Cady (77). Nous nous sommes servi nous-même, pour le réglage du four décrit plus haut, d'un pyromètre Wanner basé sur ce principe ; mais, pour repérer la température du corps noir étalon, nous avons dû rechercher une précision plus grande.

En effet, suivant qu'on admet pour la constante C les valeurs 14 300 ou 14 350 micron × degré centigrade entre lesquelles on hésite encore, le résultat trouvé pour T varie de près de 4° (aux environs de 2 000°K). Chose plus grave, les meilleurs pyromètres usuels ne se prêtent pas à une mesure très précise du rapport $\frac{b\lambda}{b_0\lambda}$.

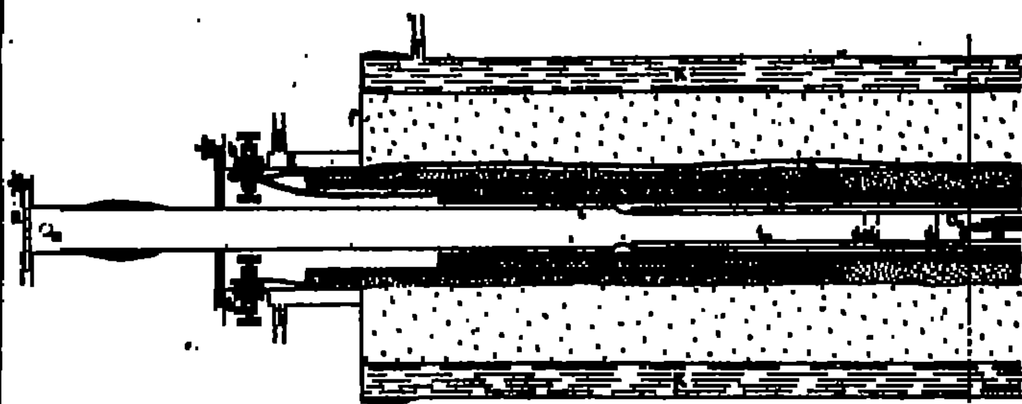


Fig. 32. — Coupe du four à enroulements de nichrome (partie avant).

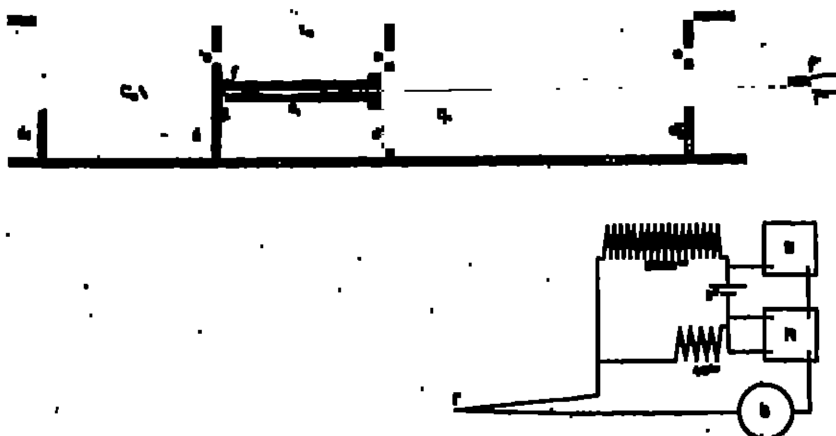
Enfin les rayonnements que l'on compare ne sont pas rigoureusement monochromatiques, ils sont délimités par un spectroscope à vision directe, et plus souvent par un simple verre coloré laissant passer une large bande spectrale : il est difficile d'évaluer avec exactitude la longueur d'onde « efficace » λ qui doit intervenir dans le calcul ci-dessus.

Nous avons repris cette méthode en nous efforçant d'utiliser une région du spectre aussi bien déterminée que possible, et de mesurer avec précision le rap-

port N des rayonnements émis dans cette région par le corps noir, soit à la température T où nous voulions l'employer comme étalon, soit à celle de fusion de l'or T_0.

La connaissance de ce nombre N suffit pour *repérer* la température considérée, sans qu'il soit besoin de la calculer par la formule (1) : on s'affranchit ainsi des erreurs correspondant à une inexactitude possible de la loi de Wien ou des valeurs admises pour C, λ, et même T_0.

Nos mesures ont été décrites en détail dans un mémoire déjà cité (55) ; nous n'en donnerons ici qu'un exposé très succinct. Elles nécessitent l'emploi d'un « *corps noir au point de fusion de l'or* » [1] auquel nous avons donné même forme et mêmes dimensions qu'au corps noir de très haute température. Ses parois ne sont pas en carbone, mais en nickel oxydé ; il est placé au centre d'un long tube de quartz que chauffent trois bobines de nichrome enroulées l'une sur toute la longueur du tube, les autres autour de ses extrémités (figure 33) et parcourues



t_n, tube de nickel ; d, d_1, d'_1, d'_2, diaphragmes de nickel ; q_1, q_1, tubes de quartz ; l, lame de platine ; f, fil d'or ; f', f'', fils de platine ; c, trous pour le passage du couple explorateur. Le tube [illegible] est porté par des tubes q_2, q_2 juxtaposés à q_1, q_1 ; G, galvanomètre ; R, relais ; B, batterie.

Fig. 33. — Dispositif permettant le réglage de la température du corps noir auxiliaire au point exact de fusion de l'or.

par des courants continus très constants, réglables séparément. Un choix convenable des intensités dans les trois bobines permet de rendre la température à l'intérieur du four uniforme à quelques dixièmes de degré près sur une longueur de plus de 12 centimètres.

L'uniformité et la constance de la température sont aisément contrôlées à l'aide de couples platine platine-rhodié pénétrant par l'arrière du four. A côté de ces

---

[1] Ce corps noir auxiliaire joue le rôle d'étalon de brillance monochromatique ; il ne peut servir directement d'étalon de lumière blanche (même si on l'associe à un écran absorbant bleuté), à cause de sa pauvreté en radiations bleues et violettes.

couples est disposé (figure 33) un circuit électrique comportant un petit fil d'or pur placé au contact de la paroi du corps noir ; une lame de platine est interposée, pour éviter la formation de l'eutectique or-nickel. On échauffe le four très lentement (de $\frac{1}{20}$ de degré par minute, par exemple), jusqu'à ce que le fil d'or fonde : la rupture du circuit provoque alors, par l'intermédiaire d'un relais, le déclenchement d'une sonnerie. On maintient ensuite la température constante, à $\frac{1°}{20}$ près, pendant tout le temps nécessaire aux mesures. L'écart entre la température ainsi réalisée et le point de fusion de l'or est vraisemblablement inférieur à $\frac{2°}{10}$.

La *comparaison des brillances monochromatiques* des deux corps noirs se fait au moyen d'un spectrophotomètre, sur la fente d'entrée duquel on amène une image réelle de l'une ou l'autre source (en déplaçant un prisme à réflexion totale). On compare ainsi successivement les flux F et F_0 qu'elles émettent, dans un même angle solide et dans une même région du spectre, à celui Φ qu'émet la lampe tare du spectrophotomètre.

Pour mesurer avec précision le rapport $\frac{F}{F_0} = N$, qui est de l'ordre de 500, on utilise un disque opaque, évidé suivant deux secteurs d'angle total ω, et mis en rotation rapide (disque de Talbot) : il laisse passer la fraction $t = \frac{\omega}{2\pi}$ du flux qu'il reçoit. Des mesures auxiliaires à la machine à diviser permettent d'évaluer à $\frac{1}{2000}$ près l'angle ω et par suite le facteur de transmission t.

On interpose cet appareil sur le passage du faisceau issu du corps noir à T° quand on compare celui-ci à la source-tare, puis sur le passage du faisceau provenant de cette dernière, quand c'est le corps noir à T_0° qu'on lui compare.

D'autre part, le flux Φ traverse un système de deux prismes de Glazebrook (polariseur et analyseur à champ normal), dont les sections principales font entre elles un angle γ réglable. Il est donc réduit dans le rapport $k \sin^2 \gamma$, k étant un facteur inférieur à $\frac{1}{2}$, constant au cours d'une série d'expériences si l'état des surfaces optiques reste le même.

Au moment de l'équilibre photométrique, on a :

soit $$tF = k\Phi \sin^2 \gamma$$

soit $$F_0 = tk\Phi \sin^2 \gamma_0,$$

d'où $$N = \frac{F}{F_0} = \frac{1}{t^2} \cdot \frac{\sin^2 \gamma}{\sin^2 \gamma_0}$$

On s'arrange pour que $\frac{1}{t}$ soit voisin de $\sqrt{N}$: les angles γ et γ_0 sont alors presque égaux, et peuvent être évalués avec la même précision. Chacune des deux mesures spectrophotométriques résulte de la moyenne d'un grand nombre de pointés, et est probablement exacte à moins de $\frac{2,5}{1000}$ près.

La *bande spectrale utilisée* est déterminée (avec une erreur probablement inférieure à 2 angströms) [1] au moyen de deux radiations du spectre du néon [2]. La longueur d'onde moyenne (6213 Å) et la largeur spectrale de la bande ont été choisies de façon à satisfaire aux deux conditions suivantes :

1° le flux lumineux reçu du corps noir au point de fusion de l'or doit être suffisant pour se prêter à des mesures précises ;

2° Les rayonnements reçus des deux corps noirs n'étant pas rigoureusement monochromatiques, la différence de leurs compositions spectrales doit être assez faible pour que le résultat trouvé pour N soit indépendant de l'observateur, — à condition bien entendu que ce dernier ait une vue à peu près normale.

D'après nos mesures, pour que le corps noir ait même couleur que l'étalon actuel à filament de carbone, il faut que N soit voisin de 460 (la bande spectrale étant déterminée comme nous venons de le dire). Le choix du nombre N suffit, nous l'avons vu, à repérer complètement la température ; il est intéressant, cependant, de calculer effectivement T, au moins d'une manière approximative.

En admettant pour T_0 et C les valeurs 1336° K et 14320 μ/degré, et pour λ 0μ,6210 (ce qui est la longueur d'onde « effective » des flux qui traversent le spectrophotomètre, relative aux températures T et T_0), on trouve, pour $N = 460$: $T = 2\,072°$ K [3]. Le calcul donne en outre : $\frac{dT}{dN} = 0,40$, ce qui veut dire que N augmente de 1 unité quand T augmente de 0°,40.

En tenant compte d'une part des erreurs possibles sur le calibrage du disque de Talbot, sur les mesures spectrophotométriques et sur la détermination de la bande spectrale utilisée ; d'autre part de l'écart existant entre nos deux radiateurs et le corps noir théorique, ainsi que des fluctuations éventuelles de leurs températures, on trouve comme limite supérieure de l'erreur relative sur N : $\frac{dN}{N} < \frac{15}{1000}$. La température T est par suite déterminée à environ 2°,5 près, ce qui correspond à

---

(1) Rappelons que l'unité angström Å vaut 1 dix-millième de micron, c'est-à-dire 10^{-8} cm.

(2) Ces radiations ont pour longueurs d'onde 6 164 et 6 266 Å ; mais les limites extrêmes de la bande spectrale utile sont en réalité 6 110 et 6 310 Å ; le facteur de transmission du spectroscope, pour les diverses longueurs d'onde intermédiaires, varie suivant une loi facile à déterminer.

(3) Nous avons antérieurement indiqué 2 074°, en admettant C = 14 310. Des expériences faites ultérieurement avec le même montage sous la direction de M. Chappuis (20) ont montré que, pour que le « corps noir » ait même couleur que les lampes étalons secondaires à filament de tungstène, il faut que N soit voisin de 1533.

un écart relatif maximum de 1,5 0/0 sur la brillance. Cette limite est d'ailleurs probablement très supérieure à l'écart réel, comme l'indique la bonne concordance des mesures photométriques que nous citerons plus loin.

La méthode précédente a donc donné déjà des résultats encourageants; il serait désirable d'en simplifier autant que possible la mise en œuvre, et en même temps d'en augmenter encore la précision.

Peut-être améliorerait-on sensiblement les mesures au spectrophotomètre en y remplaçant l'œil par une cellule photoélectrique (152) et en modifiant en conséquence la longueur d'onde moyenne et la largeur spectrale des flux « monochromatiques » à comparer.

On peut songer aussi à prendre comme température du corps noir auxiliaire le point de fusion du palladium (environ 1 553° C — 1 826° K), au lieu de celui de l'or : sa brillance monochromatique serait ainsi très accrue, et la mesure du rapport N (réduit, si l'on conserve la même bande spectrale, à environ 4,5 ou 13,6 — selon que le corps noir étudié a la couleur des étalons à filament de carbone ou celle des étalons à filament de tungstène) serait bien plus aisée. Des « corps noirs au point de fusion du palladium » ont été réalisés par divers expérimentateurs (71, 78, 116, 67), notamment par Ribaud et ses élèves (140).

Les essais poursuivis depuis plusieurs années, au Laboratoire de recherches physiques de la Société du Gaz de Paris, par M. Chappuis et ses collaborateurs (1), (20), les ont conduits à utiliser un corps noir plongé dans un bain de palladium fondu, au point de solidification. Le métal est placé dans un four vertical (2) à atmosphère d'azote, dont l'élément chauffant est une lame de molybdène (épaisseur : 0,12 à 0,15 mm) enroulée en forme de cylindre.

On peut aussi fondre le palladium par induction à haute fréquence : des expériences comparatives faites par MM. Chappuis et Ribaud ont montré que les deux méthodes de chauffage sont équivalentes.

c) *Utilisation du rayonnement total.* — Pour repérer la température du corps noir étalon, au lieu d'évaluer en valeur relative, comme nous venons de l'indiquer, sa brillance monochromatique (pour une certaine longueur d'onde) en fonction de celle d'un radiateur auxiliaire, on peut encore mesurer en valeur absolue sa radiance énergétique totale (en watts par cm^2, par exemple). Cette proposition a été faite par Müller (121), qui en poursuit la réalisation depuis plusieurs années à la Reichsanstalt.

Il ne saurait être question d'utiliser pour cette mesure les pyromètres usuels à rayonnement total, tels que celui qui nous a servi à contrôler la constance de la température de notre four à tube de carbone (3) ; ils sont en effet trop peu exacts.

---

(1) Voir page 109, le résultat de ces essais a fait l'objet d'une communication à la dernière session de la Commission Internationale de l'Éclairage (Cambridge, 1931).
(2) Modification du four Garvin et Chaudron, construit par Guinsann.
(3) Voir page 83.

Müller utilise les méthodes et appareils qui lui ont servi antérieurement pour déterminer la constante σ de la formule de Stefan (¹) (128). Il reçoit le rayonnement à mesurer sur une lame métallique l (figure 24) placée au centre d'un miroir concave hémisphérique M ; la fraction du flux incident qui est diffusée par la lame l est renvoyée sur elle par le miroir, de sorte que le pouvoir absorbant du système est très voisin de 1. On peut à volonté intercepter le flux incident et envoyer dans la lame un courant électrique qui y dégage une puissance W réglable et connue en valeur absolue : si l'échauffement de la lame l est le même au cours de ces deux expériences — ce que l'on contrôle à l'aide d'un bolomètre de surface placé en b —, on en conclut que le flux d'énergie rayonnante étudié est égal à W.

Pour que la brillance lumineuse du corps noir étalon, au voisinage de 2 075° K, soit déterminée à $\frac{1}{100}$ près, il faut, d'après le tableau de la page 60, que sa température soit repérée à $\frac{1}{0,575} = 1°,75$ près. Il faut donc que sa radiance absolue $\mathcal{R} = \sigma T^4$ (formule de Stefan) soit mesurée avec une erreur relative $\frac{d\mathcal{R}}{\mathcal{R}} = 4\frac{dT}{T}$ au plus égale à $4 \cdot \frac{1,75}{2075} = \frac{3,5}{1000}$.

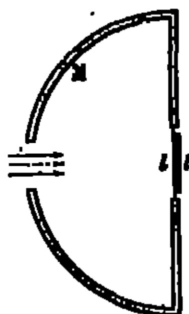


Fig. 24. — Récepteur « noir » de Müller.

Or, bien que les causes d'erreur soient ici moins nombreuses que dans les expériences de mesure de la constante σ (qui n'est connue actuellement qu'à plusieurs centièmes près), les mesures radiométriques absolues envisagées ci-dessus restent très délicates — notamment à cause des pertes d'énergie par absorption dans les milieux interposés entre le corps noir et l'appareil récepteur, à cause des conditions d'échauffement différentes des extrémités de la lame l suivant qu'elle est exposée au rayonnement ou traversée par le courant, etc. — Il sera donc bien difficile d'y atteindre une précision de l'ordre de quelques millièmes !

(¹) Voir page 66.

d) Utilisation simultanée du rayonnement monochromatique et du rayonnement total (Méthode de Warburg). — En même temps que la méthode précédente, Müller étudie également à la Reichsanstalt (122, 123) un autre mode de repérage de la température T du corps noir, suggéré dès 1917 par Warburg (178).

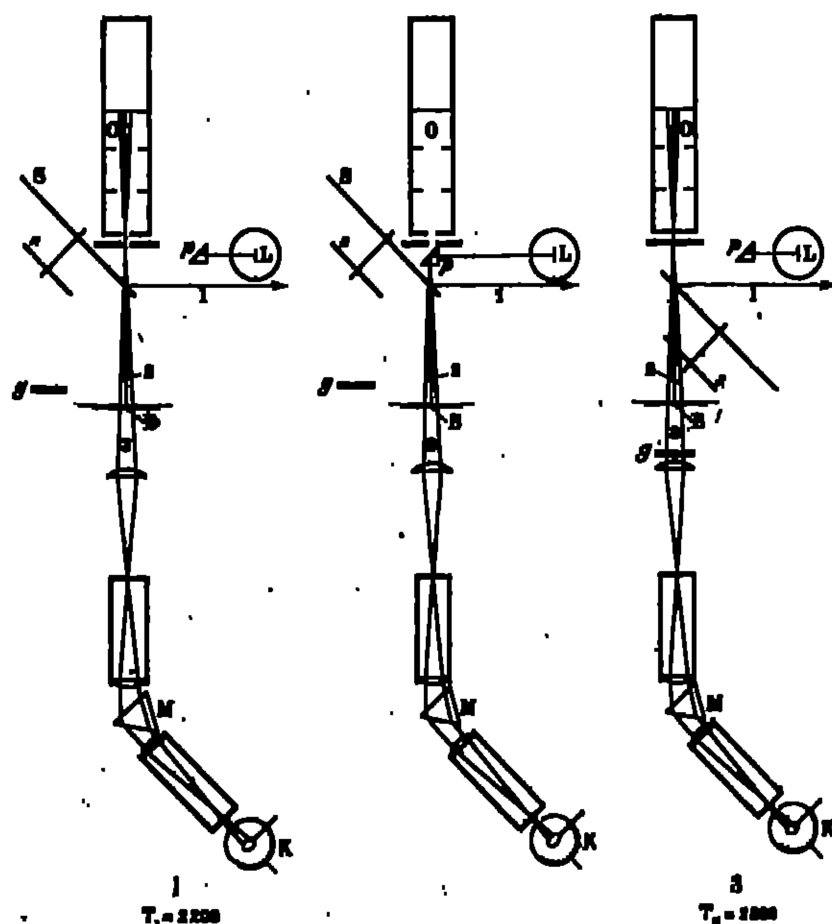


Fig. 35. — Montage de Müller (Méthode de Warburg).

Il consiste à porter successivement le corps noir à deux températures différentes T et T_1, et à mesurer :

1° à l'aide d'une cellule photoélectrique le rapport $\frac{r}{r_1}$ des radiances spectrales à ces deux températures, pour une même longueur d'onde λ (¹) ; d'où (en

(¹) Warburg proposait pour λ la valeur 0μ, [illegible] ; Müller préfère utiliser la région bleue du spectre pour laquelle ses cellules photoélectriques sont bien plus sensibles.

appliquant la loi de Wien et en supposant bien connue la constante C qui y intervient) la différence

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C} \log \text{nép} \frac{r}{r_1}; \qquad (1)$$

2° à l'aide d'un bolomètre, le rapport $\frac{\mathcal{R}}{\mathcal{R}_1}$ des radiances énergétiques aux mêmes températures; d'où (en vertu de la loi de Stefan) le rapport

$$\frac{T}{T_1} = \sqrt[4]{\frac{\mathcal{R}}{\mathcal{R}_1}}. \qquad (2)$$

On calcule T en éliminant T_1 entre les équations (1) et (2). Cette méthode a sur les précédentes l'avantage de ne pas nécessiter de mesures absolues, et de ne pas faire appel à un repère thermométrique auxiliaire tel que le point de fusion de l'or. Elle a le défaut d'exiger une extrême précision (de l'ordre de quelques dix-millièmes) dans les deux mesures relatives qu'elle implique.

Pour la mettre en œuvre, Müller utilise le dispositif représenté schématiquement sur la figure 35. Le rayonnement du corps noir O tombe sur un disque de Talbot S en rotation rapide, évidé suivant plusieurs secteurs d'angle total ω. La fraction $\frac{\omega}{2\pi}$ du flux incident traverse ce disque et vient tomber sur un bolomètre B en forme de grille, qui en absorbe une partie; les radiations qui ont passé à travers la grille du bolomètre sont reçues par un monochromateur M derrière lequel est disposée la cellule photoélectrique K. Le disque de Talbot, étant placé à 45° du flux incident, forme miroir et réfléchit dans la direction du photomètre (flèche f de la figure) une fraction connue de la lumière émise par le corps noir.

Ce dispositif permet d'effectuer simultanément les mesures de brillance lumineuse, de brillance totale et de brillance monochromatique — et par suite d'utiliser un corps noir dont la température n'est pas rigoureusement constante. On donne à cette température d'abord la valeur $T_1 = 2\,100°K$, les appareils étant disposés comme l'indique le schéma 1 (figure 35); puis la valeur $T_2 = 2\,800°K$ (la température T de l'étalon sera en fait intermédiaire entre T_1 et T_2), ce qui multiplie la brillance totale par 3 et la brillance spectrale par 50 environ. Dans le second cas on interpose un disque de Talbot supplémentaire s et un verre absorbant (schéma 3) pour ramener les indications du bolomètre et de la cellule à être sensiblement les mêmes que dans la première expérience.

En déplaçant le prisme à réflexion totale p, on peut substituer (schéma 2) au rayonnement du corps noir celui d'une lampe auxiliaire L parfaitement constante, ce qui permet d'éliminer les erreurs dues aux variations éventuelles des appareils de mesure.

Müller enregistre pour une méthode spéciale les indications d'un électromètre à corde lui permettant de mesurer à $\frac{1}{1000}$ près le courant débité par la cellule

(qui est de l'ordre de 10^{-11} ampère). Il s'est appliqué d'autre part à vérifier la légitimité de l'usage d'un disque de Talbot pour les mesures photométriques et radiométriques. Il n'a pas publié encore les résultats d'ensemble de ses recherches.

e) Méthodes utilisant la variation de composition spectrale du rayonnement du corps noir en fonction de sa température. — Dans le rayonnement émis par le corps noir, l'intensité relative des radiations bleues par rapport aux radiations rouges augmente en même temps que la température (au-dessous de 5 000°K), ce qui pourrait encore servir à repérer la température de l'étalon photométrique.

La radiance spectrale monochromatique du corps noir à T° est, d'après la formule de Planck-Wien;

pour la longueur d'onde λ : $r = k\lambda^{-5}e^{-\frac{C}{\lambda T}}$

et pour la longueur d'onde λ' : $r' = k\lambda'^{-5}e^{-\frac{C}{\lambda' T}}$

La mesure du rapport

$$\frac{r}{r'} = \left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)^5 e^{\frac{C}{T}\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda'}\right)}$$

permettrait d'évaluer T connaissant λ, λ' et C.

Malheureusement, le récepteur non sélectif (bolomètre ou pile thermoélectrique) dont cette mesure nécessite l'emploi est relativement peu sensible ; or les flux « monochromatiques » à mesurer sont très faibles, surtout si on utilise des bandes spectrales étroites. D'autre part, les pertes de lumière par absorption, diffusion, etc., varient beaucoup avec la longueur d'onde, ce qui augmente les risques d'erreur. Il paraît donc difficile de déterminer T par cette méthode avec précision.

Une autre manière de repérer la composition d'un faisceau de radiations — et par suite indirectement la température de la source — consiste à mesurer le facteur de transmission (pour le rayonnement considéré) d'un corps absorbant convenablement choisi. Cette méthode, appliquée jadis par Lummer et Kurlbaum au cas d'une lame de platine incandescente (116), a été reprise par Chappuis (29) dans le cas d'un corps noir, mais il ne semble pas qu'elle soit plus avantageuse que les précédentes.

5. Mesures photométriques sur le « corps noir étalon ». Nous avons passé en revue les diverses méthodes qui ont été mises en œuvre pour construire un corps noir susceptible de servir d'étalon photométrique et pour repérer avec précision sa température. Il reste à voir jusqu'à quel point le rayonnement lumineux des radiateurs ainsi réalisés est effectivement constant et reproductible.

Le résultat des mesures photométriques faites par Ives sur son « corps noir au point de fusion du platine », par comparaison avec les étalons actuels, a été indiqué page 79.

Nous avons effectué des mesures analogues sur notre corps noir à tube de

carbone, décrit plus haut. Notre montage est représenté schématiquement sur la figure 36 ; la figure 37 reproduit une photographie de l'ensemble des appareils.

Le four contenant le corps noir C est fermé par une lame à faces parallèles en quartz 6, en avant de laquelle est une lentille achromatique 2 qui forme en 1 une image réelle de l'ouverture du corps noir. La brillance lumineuse de cette image est égale à celle B de la source, réduite dans un rapport connu θ par l'absorption de la lame de quartz et de la lentille.

Un diaphragme placé en 1 limite une portion de cette image réelle, d'aire connue σ, qui éclaire l'une des plages d'un photomètre Lummer et Brodhun à contrastes 3. On déplace ce photomètre sur le banc $X'X$; il entraîne dans son mouvement une lampe-tare 4 à régime bien constant, qui lui est rigidement liée.

On peut à volonté substituer à l'image du corps noir (d'intensité lumineuse $\sigma\theta B$) une lampe étalon à filament de carbone, d'intensité I. Soient d et δ les distances de ces deux sources au photomètre, au moment où les plages de celui-ci paraissent

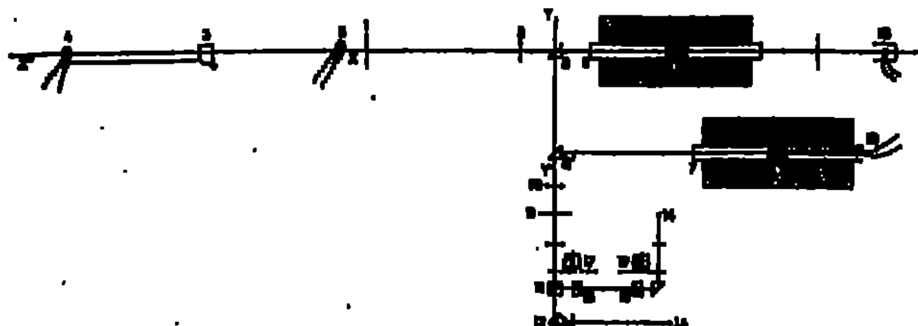


Fig. 36. — Montage d'ensemble (P. Fleury). Disposition des principaux appareils.

C, corps noir à T°; C_m, corps noir à T_m°; 1, diaphragme d'aire σ, dans le plan de l'image réelle de l'ouverture du corps noir C formée par la lentille achromatique 2; 3, photomètre; il se déplace sur le banc X'X en entraînant la lampe tare 4; 5, position éventuelle de la lampe étalon provisoire I. (le corps noir C étant masqué); 6, 7, lames de quartz à faces parallèles identiques; 8 ou 8', prisme à réflexion totale (mobile sur le banc Y'Y), renvoyant vers le spectrophotomètre le flux issu de l'un ou l'autre des corps noirs; 9, image réelle de l'ouverture de C ou de C_m formée à l'entrée du spectrophotomètre par le prisme 8 (8') et la lentille 10; 11, cube de Lummer du spectrophotomètre; 12, prisme disperseur; 13, position de l'œil; 14, lampe tare du spectrophotomètre; 15, 16, prismes de Glazebrook; 17, 17', positions données successivement au prisme de Talbot; 18, pyromètre à rayonnement total, servant à contrôler la constance de température du corps noir C; 19, couple platine-platine rhodié, servant à contrôler la constance de température du corps noir C_m.
(Le spectrophotomètre est représenté très schématiquement).

également éclairées, on a :

$$\frac{\sigma\theta B}{d^2} = \frac{I}{\delta^2},$$

d'où

$$B = \frac{I\delta}{\sigma\theta d^2}.$$

Chacun des facteurs θ et $\frac{\delta}{d^2}$ est déterminé par deux mesures photométriques qui résultent de la moyenne d'un grand nombre de « pointés » faits dans les

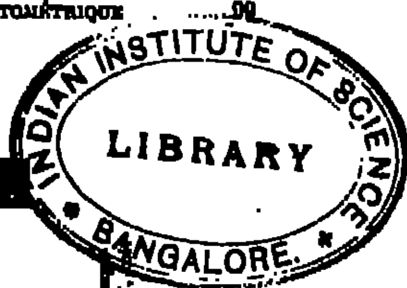




Fig. 57. — Vue de la salle d'expériences.

[illegible]

meilleures conditions (l'intensité de la lampe-tare étant maintenue constante à $\frac{3}{10\,000}$ près); on peut espérer que l'erreur relative correspondant à chacune de ces quatre mesures est inférieure à $\frac{2}{1\,000}$. Nous avons pu, d'autre part, mesurer ϵ à $\frac{1}{1\,000}$ près.

L'intensité I est maintenue fixe, au cours des mesures successives, à $\frac{3}{10\,000}$ près (1). Enfin, nous avons dit que la brillance de notre corps noir peut être, pendant chaque expérience, maintenue constante à moins de $\frac{6}{10\,000}$ près.

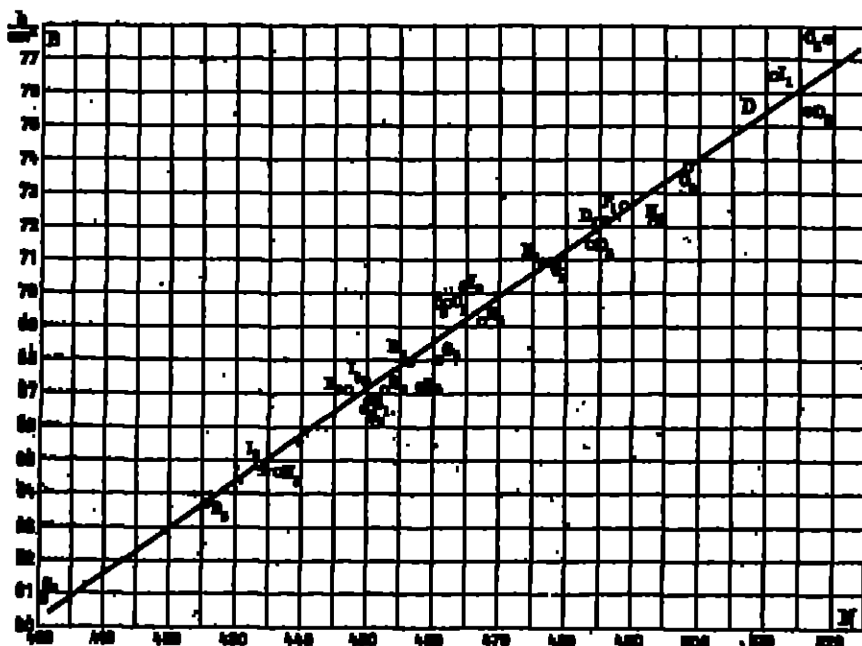


Fig. 38. — Courbe $B = f(N)$ (P. Fleury).

L'erreur relative sur le rapport $\frac{B}{I}$ est donc probablement inférieure à

$$\frac{8 + 1 + 0{,}3 + 0{,}6}{1\,000}, \qquad \text{soit} \qquad \frac{1}{100}.$$

Nous avons effectué 26 expériences complètes sur notre corps noir, porté à des températures diverses (voisines de 2 075° K), mais bien constantes au cours de chaque mesure. Nous avons mesuré chaque fois la brillance B et la valeur du rap-

(1) La lampe à incandescence-étalon a été comparée à diverses reprises à une autre lampe servant de témoin.

port N servant à caractériser, comme nous l'avons dit page 89, la température.

En représentant graphiquement par un point chaque résultat, on trouve que la courbe moyenne $B = f(N)$ (fig. 38) est assimilable à une droite d'équation :

$$B\ (b/cm^2) = 68,5 + 0,14\ (N - 460)$$

tant que N reste compris entre 450 et 470 (la température est alors voisine de 2068 à 2076°K) (1). Les écarts correspondant à chaque expérience, par rapport à cette courbe moyenne, sont (comme l'indique le tableau XII) tous inférieurs à $\frac{14}{1000}$, et la moyenne de leurs valeurs absolues est de $\frac{6}{1000}$.

TABLEAU XII. — MESURES PHOTOMÉTRIQUES SUR LE CORPS NOIR A TUBE DE CARBONE (FLEURY) (voir figure 38)

Date	Point	N	B (b/cm²)	$\frac{\Delta B}{B}$ (*)
6 février	B_1	450,1	66,76	— 5,5
11 février	C_1	462,2	69,72	12,5
	C_2	519,3	77,63	9
	C_3	463,2	69,72	12,5
13 février	D_1	516,2	78,14	— 12
	D_2	483,5	71,46	— 3
	D_4	458,0	67,21	— 14
	D_5	438,5	63,72	0
	D_6	456,6	67,97	— 0,5
	D_7	486,3	72,18	1,5
25 février	F_1	488,6	72,63	2
	F_2	447,1	67,00	5
27 février	G_1	400,9	60,81	7
	G_2	449,8	66,57	— 7,5
	G_3	477,2	70,92	0,5
	G_4	498,4	73,58	0
	G_5	460,9	68,00	— 9
2 mars.	H_1	476,4	70,92	2
	H_2	463,7	67,07	— 6
	H_3	436,6	64,64	— 9
	H_4	467,3	69,14	— 5
	H_5	492,1	72,06	— 12,5
4 mars.	I_1	511,1	76,40	10,5
	I_2	464,6	70,22	14
	I_3	432,7	64,80	0,5
	I_4	440,9	67,44	5

(*) Écart relatif par rapport à la courbe moyenne (en millièmes).

(1) M. *Chappuis* et ses collaborateurs sont arrivés de même, en prenant comme point de repère un corps noir au point de fusion du palladium, et en utilisant le même domaine spectral que ci-dessus pour la détermination de N, à des résultats s'exprimant par les formules provisoires :

$B\ (b/cm^2) = 68,5 + 14,75\ (N - 4,60)$ au voisinage de 2070°K

et $B\ (b/cm^2) = 240 + 20,5\ (N - 18,83)$ au voisinage de 2350°K.

La concordance de ces premiers résultats expérimentaux est très encourageante. Nous avons dû interrompre nos recherches (¹) en 1926, par suite de notre départ pour une mission de plusieurs années hors de France. Elles ont été reprises au Laboratoire de Recherches Physiques de la Société du Gaz de Paris, sous la direction de M. J. Chappuis (22) et sous les auspices du Comité Français de l'Éclairage (²). (Voir pages 69, 82, 84, 92, 93, 97, 101).

Dès que les résultats en seront confirmés, ainsi que ceux obtenus dans les autres laboratoires, on pourra choisir, entre les diverses solutions proposées, celle qui par sa précision, sa sécurité et autant que possible sa simplicité, fournira le meilleur étalon d'intensité lumineuse.

6. Addendum : communication récente du « Bureau of Standards » relative à un corps noir au point de solidification du platine. — Depuis la composition des pages qui précèdent, nous avons eu connaissance d'une communication très importante faite en mars 1930 au Comité consultatif d'électricité du Comité International des Poids et Mesures par M. G. K. Burgess (16). Ce rapport indique le résultat provisoire de recherches poursuivies au *Bureau of Standards* par MM. Wensel, Roeser, Barbrow et Caldwell (171), en vue de réaliser un corps noir au point de solidification du platine stable et reproductible.

Pour diminuer les risques de contamination du métal pendant la fusion, ces expérimentateurs l'ont chauffé par induction à haute fréquence dans un creuset de thorine (oxyde de thorium) fondue, broyée et agglomérée à l'aide d'une solution de chlorure de thorium. La pureté du platine employé est contrôlée par des mesures de sa résistivité électrique : le rapport des valeurs trouvées à 100° C et à 0° C n'est pas (et ne devient pas au cours des fusions successives) inférieur à 1,390. La proportion d'impuretés serait inférieure à 3/100.000.

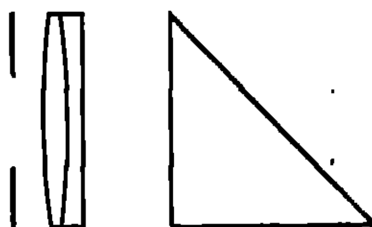
Le corps noir est constitué par un tube de même substance que le creuset, ayant seulement 2 mm, 5 de diamètre intérieur, et 0 mm, 25 à 0 mm, 50 d'épaisseur ; ce tube, dont le fond est rempli de thorine en poudre sur une hauteur de 10 à 15 mm, plonge dans le bain de platine comme l'indique la figure 30. Le creuset, qui a 17 mm de diamètre intérieur à la base, 22 mm au sommet, et 45 mm de profondeur, est fermé par un couvercle de thorine agglomérée, percé d'un trou dont le diamètre est inférieur de 0 mm, 6 à celui du tube corps noir.

(¹) Qui avaient été poursuivies au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure, sous la haute direction de M. H. Abraham, professeur à la Sorbonne.

(²) Une commission comportant des représentants de l'École Normale Supérieure, de la Société du Gaz de Paris, du Laboratoire Central d'Électricité, de l'Institut d'Optique, et plus récemment des Facultés des Sciences de Lille et de Strasbourg, assure l'orientation générale des recherches. Le matériel et le personnel nécessaires ont été mis à sa disposition par le Président du Comité Français de l'Éclairage, M. Roland, agissant en tant qu'Administrateur délégué de la Société du Gaz de Paris. M. Chappuis, directeur du Laboratoire de recherches physiques de cette société, et ses ingénieurs MM. Goulé, Simonin et Laure ont étudié systématiquement depuis plusieurs années les conditions optima de réalisation du corps noir-étalon photométrique. Ils semblent devoir arriver prochainement à des conclusions définitives.

Il est calorifugé à l'aide de thorine en poudre, ce qui évite l'échappement du platine par les fentes qui se produisent ordinairement dans le creuset. La figure 40 reproduit une photographie du creuset, du tube corps noir et du lingot de platine.

Le métal fondu est fortement brassé par les actions électromagnétiques auxquelles il est soumis ; il en résulte une uniformisation de la température. On



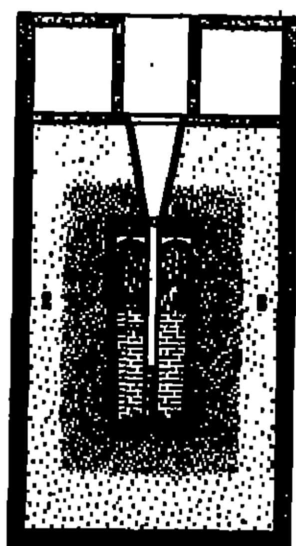


Fig. 39. — Corps noir au point de solidification du platine (Wensel, Roeser, Barbrow et Caldwell).
1, platine ; 2, thorine non fondue ; 3, thorine fondue et broyée.

n'utilise que les mesures photométriques faites pendant le passage du platine de l'état liquide à l'état solide ; l'apport d'énergie au four à induction est maintenu suffisant, pendant la solidification, pour que celle-ci soit assez lente, et que l'intensité lumineuse reste constante pendant 3 minutes au moins.

La figure 41 est un schéma du dispositif photométrique utilisé, qui semble analogue à celui de Ives (voir page 70). On compare les brillances d'une lame

translucide N (éclairée par une lampe-tare M et d'une plaque de carbonate de magnésium H sur laquelle on forme, à l'aide d'une lentille L (distance focale : 25 cm), une image réelle de l'ouverture du corps noir J. Contre la lentille est disposé un diaphragme K d'aire A (diamètre d'ouverture : 1 cm, 908 2), dont la distance au plan H est D (340 cm environ); l'éclairement de ce plan est donc $\frac{BAT}{D^2}$, en appelant B la brillance du corps noir et T le facteur de transmission de l'ensemble prisme-lentille.

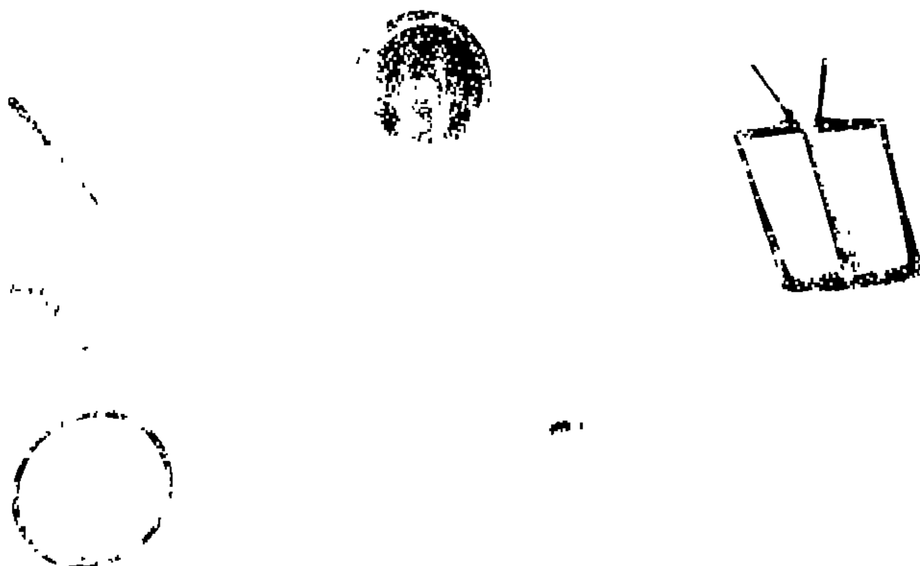


Fig. 40. — Photographie des diverses pièces de l'appareil de Wensel, Roeser, Barbrow et Caldwell.

On masque ensuite le corps noir, et on éclaire directement la plaque H par une lampe étalon I, d'intensité lumineuse S, placée à une distance D_s (125 cm environ) : le nouvel éclairement est $\frac{S}{D_s^2}$.

Soient D_e et $D_{e'}$ les valeurs (voisines de 125 cm) trouvées pour la distance MN au moment de l'équilibre photométrique dans la 1re et dans la 2e expérience. On a :

$$\frac{BAT}{D^2} \cdot D_e^2 = \frac{S}{D_s^2} \cdot D_{e'}^2,$$

d'où :

$$B = \frac{S}{AT}\left(\frac{D}{D_s} \frac{D_{e'}}{D_e}\right)^2.$$

La valeur trouvée a été : B = 58,84 b/cm², ce qui conduirait à définir la bougie comme l'intensité lumineuse d'un corps noir au point de solidification du platine ayant une surface apparente (projetée sur un plan normal à la direction d'observation) de 1 cm², 700.

Les auteurs pensent avoir déterminé l'aire A à $\frac{3}{10\,000}$ près, le facteur de transmission T (qui est égal à 0,769 3) à $\frac{5}{10\,000}$ près, et les distances telles que

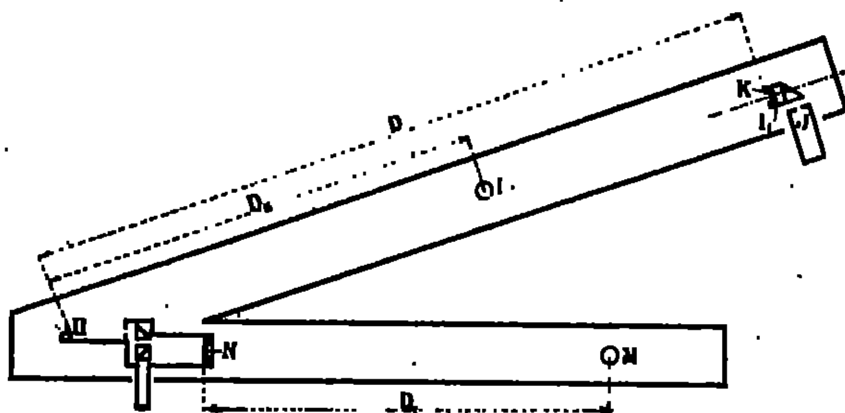


Fig. 41. — Mesures photométriques sur le corps noir au point de solidification du platine (Bureau of Standards).

D à $\frac{2}{10\,000}$ près, de telle sorte que l'erreur relative totale ne dépassait pas 1 ou 2 millièmes. Les nombres publiés, se rapportant à 40 mesures faites sur 3 lingots de platine différents, ne s'écartent pas de plus de $\frac{6,6}{1\,000}$ de la valeur moyenne indiquée ci-dessus.

Cette valeur concorde avec celle obtenue en 1926 par Brodhun et Hoffmann (16) mais est supérieure de 6 0/0 au résultat des mesures de Ives (30), décrites pages 69 et suivantes, qui étaient sans doute entachées d'une erreur systématique.

Des expériences sont actuellement en cours pour reproduire le travail des physiciens du Bureau of Standards dans d'autres laboratoires. Si, comme on peut l'espérer, elles confirment la précision des premiers résultats, le « corps noir au point de solidification du platine » sera d'une très grande utilité, soit qu'on l'emploie directement comme étalon de lumière, soit qu'on le prenne comme terme de comparaison (au lieu d'appareils analogues aux points de fusion de l'or ou du palladium) pour repérer la température d'un « corps noir étalon » ayant la couleur des lampes au tungstène.

CONCLUSION

Nous avons indiqué, au début de cette étude, les considérations fixant le choix des étalons destinés aux mesures photométriques. Les anciens étalons à flamme ne semblent devoir servir désormais qu'exceptionnellement : depuis le début de ce siècle, des lampes à incandescence, construites et utilisées avec des précautions dont nous avons donné le détail, les ont progressivement remplacés.

Grâce à leur emploi, les éclairagistes disposent aujourd'hui d'étalons d'intensité lumineuse, de flux et de brillance extrêmement commodes, bien constants, et dont la gamme de couleurs permet de rendre homochromes toutes les mesures courantes.

Deux problèmes se posent encore, celui de la comparaison précise des lampes étalons secondaires à filament de tungstène avec les lampes à filament de carbone qui servent actuellement d'étalon primaire, et celui de la substitution à ces dernières d'un étalon fondamental plus satisfaisant. Le premier de ces problèmes nécessite une fixation de la technique des mesures hétérochromes sur laquelle un accord semble devoir être prochainement réalisé. Le second sera sans doute résolu lui aussi d'ici quelques années, grâce aux efforts poursuivis de divers côtés pour construire un « corps noir étalon de lumière » et pour en déterminer exactement les conditions d'emploi.

Il y a donc lieu d'espérer que le Comité International des Poids et Mesures, qui s'est assez récemment saisi de ces questions, pourra, dans un avenir rapproché, entérinant les résultats obtenus en divers pays par les principaux Laboratoires d'étalonnage et de recherches physiques, assurer, pour le bien de la science et de la technique de l'éclairage, une unification complète des systèmes d'unités photométriques.

BIBLIOGRAPHIE

I. Ouvrages fréquemment cités.

Abréviations.	Titre complet.
Palaz.	A. Palaz. *Photométrie industrielle.* (Carré, éd., Paris, 1892).
Liebenthal.	E. Liebenthal. *Praktische Photometrie.* (Vieweg, éd., Brunswick, 1907).
Uppenborn.	F. Uppenborn & B. Monasch. *Lehrbuch der Photometrie.* (Oldenbourg, éd., Berlin, 1912).
Walsh.	J. W. T. Walsh. *Photometry.* (Constable, éd., Londres, 1926).
Fabry. — Intr. à la phot.	Ch. Fabry. *Introduction générale à la photométrie,* tome I de l'Encyclopédie photométrique. (Revue d'Optique, éditeur, Paris, 1927).
C. I. E. (1921).	Recueil des travaux et Compte rendu des Séances de la *Commission internationale de l'Éclairage ;* 5e session, tenue à Paris en 1921. (The National Physical Laboratory, éditeur, Teddington, 1923). Les décisions prises à cette réunion sont reproduites dans Rev. Gén. El. *10* (1921) 84.
C. I. E. (1924).	— Id. — 6e session, tenue à Genève en 1924. (N. P. L., éditeur, Teddington, 1926). Décisions reproduites dans Rev. Gén. El. *16* (1924) 1[illegible].
C. I. E. (1928).	— Id. — 7e session, tenue à Saranac Inn (États-Unis) en 1928. (N. P. L., éditeur, Teddington, 1929). Extraits reproduits dans Rev. Gén. El. 26 (1929) 609, 643, 689, 771, 810, 863 et 904.
Congrès Photog. (1925).	Décisions, procès-verbaux, rapports & mémoires du 6e *Congrès International de Photographie,* tenu à Paris en 1925. (Soc. française de Photographie, éditeur, Paris, 1926).
Congrès Photog. (1928).	Proceedings of the seventh international Congress of Photography. (London, 1928). (Heffer & Sons, éd., Cambridge, 1929).

II. Périodiques cités.

(L'astérisque indique les périodiques dont la publication est interrompue.)

ABRÉVIATIONS.	TITRES COMPLETS.
Am. I. E. E. Trans.	Transactions of the American Institute of Electrical Engineers (New-York).
Ann. Chim. et Phys.	Annales de chimie et de physique (Paris) (*).
Ann. Obs. Paris.	Annales de l'Observatoire de Paris.
Ann. de Phys.	Annales de Physique (Paris).
Ann. der Phys.	Annalen der Physik (Leipzig).
Astrophys. J.	Astrophysical Journal (Chicago).
Brit. Ass. Rep.	Report of the British Association for the Advancement of Science (Londres).
Berlin Ber.	Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaft zu Berlin.
B. Stand. Bull.	Bulletin of the Bureau of Standards (Washington).
B. Stand. J. Res.	Bureau of Standards Journal of Research (Washington).
Chem. News.	Chemical News (Londres).
C. R.	Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Paris).
Deut. Phys. Ges. Verh.	Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (Brunswick) (*).
Ecl. El.	L'éclairage électrique (Paris) (*).
Electrician.	Electrician (Londres).
Eletirot.	L'elettrotecnica (Milan).
El. Rev.	The electrical review (London).
El World.	Electrical World (New-York).
E u. M.	Elektrotechnik und Maschinenbau (Vienne).
E. T. Z.	Elektrotechnische Zeitschrift (Berlin).
Frank. Inst. J.	Journal of the Franklin Institute (Philadelphie).
Illum. Eng.	The Illuminating Engineer (London).
Illum. Eng. Soc. Trans.	Transactions of the Illuminating Engineering Society of New-York.
Ind. El.	L'Industrie électrique (Paris).
Inst. El. Eng. J.	Journal of the Institution of Electrical Engineers (Londres.)
J. de Phys.	Journal de Physique (Paris).
J. of Gas Light.	Journal of Gas Lighting (Londres).
J. G. W.	Journal für Gasbeleuchtung und verwandte Beleuchtungsarten, sowie für Wasserversorgung (Berlin).
J. Us. Gaz.	Journal des Usines à Gaz (Paris).
Lum. El.	La Lumière électrique (Paris) (*).
Nature.	Nature (London).
N. P. L. Coll. Res.	Collected Researches of the National Physical Laboratory (Teddington).

Opt. Soc. Am. J.	Journal of the Optical Society of America and Review of scientific Instruments (Menasha).
Phil. Mag.	The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Londres).
Phil. Trans.	Philosophical Transactions of the Royal Society (Londres).
Photog. J.	Photographic Journal (Londres).
Phys. Ber.	Berichte der deutschen physikalischen Gesellschaft (Berlin).
Phys. Rev.	Physical Review (New-York).
Pogg. Ann.	Poggendorffs Annalen der Physik (Leipzig) (*)
Rev. gén. El.	Revue générale de l'Electricité (Paris).
Rev. Opt.	Revue d'Optique théorique et instrumentale (Paris).
Roy. Soc. Proc.	Proceedings of the Royal Society (série A) (Londres).
Sc. & Ind. photog.	Science et Industries photographiques (Paris).
Soc. Franç. El. Bull.	Bulletin de la Société Française des Electriciens (Paris).
Soc. Int. El. Bull.	Bulletin de la Société Internationale des Electriciens (Paris).
Wien Ber.	Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien.
Zentralblatt f. Elektrot.	Zentralblatt für Elektrotechnik (Munich) (*).
Z. f. Phys.	Zeitschrift für Physik (Brunswick).
Z. f. I.	Zeitschrift für Instrumentenkunde (Berlin).
Z. techn. Phys.	Zeitschrift für technische Physik (Leipzig).

III. Mémoires cités.

(Les numéros de la seconde colonne sont ceux des pages de cet ouvrage contenant des références au mémoire considéré.)

1 63 Abney (W.). « On fixing a standard of light. »
Roy. Soc. Proc. 27 (1878) 157.
Phil. Trans. 173 (1881) 887.
Brit. Ass. Rep. (1883) 422.
Nature 28 (1883) 603.
J. de Phys. 3 (1884) 416.
2 63 Allen (N. A.). (Emploi d'un arc comme étalon de lumière).
El. Rev. 93 (1923) 228.
3 20 Angström « L'énergie dans le spectre visible de l'étalon Hefner. »
Phys. Rev. 17 (1903) 302.
4 14 Audouin (P.), & Bérard (P.). « Étude sur les divers becs employés pour l'éclairage au gaz. »
Ann. Ch. et Ph. 65 (1862) 423.
5 27 Baillaud (J.). (Études de sensitométrie et de photométrie photographiques).
Ann. Obs. Paris. Mémoire 29 (1910).
C. I. E. (1924) 91
Sc. et Ind. Photog. 5 M (1925) 37, 53.
5 bis 26 Baillaud (J.), & Jouaust (R.). « Étude de la température de couleur de la flamme d'acétylène. »
Cong. Photog. (1925) 97.
5 ter 28 Baillaud & Séverian. « Étalon de lumière à flamme oxyacétylénique »
Publications de l'Office central de l'acétylène, 22, Boulevard de la Chapelle, Paris.
6 62 Blondel (A.). (Emploi de l'arc comme étalon).
Int. El. Cong. Chicago. Proc. (1893) 315.
Lum. El. 50 (1893) 222.
Electrician 32 (1893) 117, 145, 169.
7 16, 26 — Rapport sur les unités photométriques au Congrès International
65 des Électriciens (Genève, 1896).
Écl. El. 8 (1896) 341 et 390.
8 26 — « Sur un nouvel étalon de lumière » (Benzine & alcool).
Écl. El. 16 (1898) 317.
El World 33 (1899) 250.
9 53 — « Mesure de la brillance et de la radiance des surfaces diffusantes »,
Rev. gén. El. 24 (1928) 507, 543.
C. R. 186 (1928) 1487, 2677.
10 20 Bolzmann (A.) & Basch (A.) (Influence de la pression atmosphérique sur l'intensité de la lampe Hefner.)
Wien. Ber. 131 (1922) 57.
Z. f. I. 43 (1923) 229.
Z. techn. Phys. 4 (1923) 7.

11 31 Bond « Working standards of light and their use in the photometry of Gas. »
Frank. Inst. J. *165* (1908) 180.

12 1 Bordoni (U.) « De l'opportunité de modifier les conventions sur l'unité photométrique étalon. »
C. I. E. (1921) 83.
Elettrot. *6* (1919) 430 et *9* (1922) 37.

13 67 Boutaric & Vuillaume « Sur quelques propriétés des sources lumineuses à rayonnement intégral. »
Rev. Opt. 2 (1923) 41.

14 2 Broca (A.) « Études théoriques & expérimentales sur les sensations visuelles et la photométrie. »
J. de Phys. 3 (1894) 206.

14 *bis* 16 — « Les méthodes photométriques ».
Ecl. él. *6* (1896) 148.

15 26 — « Emploi de la lampe à naphtaline comme étalon secondaire. »
Ecl. él. *8* (1896) 84.

16 70, 80, 105 Brodhun (E.) & Hoffman (F.) « Die gesamthelligkeit des schwarzen Strahlers beim Pd und Pt schmelzpunkt und ihre Verwendbarkeit für eine Lichteinheit. »
Z. f. Phys. *37* (1926) 137.
Z. f. I. *44* (1924) 117 ; *45* (1925) 238 ; *46* (1926) 172.

17 32 Buckley (H.), Collins (L. J) & Brookes (F. J. C.) « The colour temperature and luminous efficiency relation for tungsten. »
C. I. E. (1924) 203.

18 103 Burgess (G.) « Propositions concernant l'étalon primaire de lumière. » Comité Consultatif d'électricité du Comité International des Poids et Mesures Procès-verbaux des séances de 1930, page 178.

18 *bis* 60 Burgess & Waltenberg « Pouvoir émissif des métaux & oxydes. »
B. Stand. Bull. *11* (1915) 599.

19 1 Campbell (N.) & Dudding (B. P) « The measurement of light. »
Phil. Mag. *44* (1922) 577.

20 63, 92, 97, 102 Chappuis (J.) (Corps noir étalon photométrique).
C. I. E. (1928) 1102.

21 80 Coblentz (W. W.) « Constants of spectral radiation of a black body ».
B. stand. Bull. *10* (1913) *1* ; *10* (1914) 1.

22 20 — « Measurements on Standards of Radiation in absolute value. »
B. stand. Bull. *11* (1914) 87.

23 26 — « Distribution of energy in the spectrum of an acetylene flamme. »
B. stand. Bull. *7* (1911) 243 ; *9* (1913) 81 ; *15* (1919) 639.

24 68 — « The present status of the constants and verification of laws of thermal radiation of a uniformly heated enclosure. Opt. soc. Am. J. *8* (1924) 11.

25 8, 86 Congrès international des électriciens, (Paris, 1880).
Comptes rendus, page 109. Lum. El. *33* (1880) 477.

26 IX Crittenden (E.-C.). « Étalons primaires de lumière ».
C. I. E. (1924) 46.

27 48 — Photométrie hétérochrome.
C. I. E. (1924) 130.
28 47 Crittenden (E.-C.) & Richtmyer.
B. Stand. Bull. *14* (1917) 87.
29 23, 24, 25 Crittenden (E.-C.) & Taylor (A.-H.). « The pentane lamp as a working standard ».
B. Stand. Bull. *10* (1914) 391.
30 33,43,44, 46,48,52 Crittenden (E.-C.) & Meyer (J.-F.). « Status of candlepower standards ».
C. I. E. (1928) 1138.
31 47 Crova. « Comparaison photométrique des lumières de teintes différentes ».
Ann. Ch. & Phys., (1883) 528.
32 61 Cross (C.-R.). (Etalon au platine).
Electrician *17* (1886) 514.
Lum. El. *22* (1886) 507.
33 2 Dauber (J.). Z. f. I. *35* (1915) 308.
34 18 Dassel (M.). « Recherches sur la stabilisation de la flamme de la lampe Hefner ».
Congrès Photog. (1905) 106.
35 14 Dibdin (W.-J.). (Rapport au Metropolitan Board of Works).
J. of Gas. Light. *45* (1885) 570.
35 *bis* 57 — Lum. El. *26* (1887) 588.
36 2 Dow (J. S.). Ill. Eng. *3* (1910) 236.
37 24 — « The sources of error in the Harcourt 10 c. p. pentane standard ».
El. Rev. *59* (1906) 491.
38 8, 14 Dumas (J.-B.) & Regnault. « Instruction pratique donnant la marche à suivre pour les expériences relatives à la détermination journalière du pouvoir éclairant et de la bonne épuration du gaz de la Compagnie Parisienne (12 décembre 1860) ».
Ann. Ch. & Phys. *65* (1862) 486.
39 30 Draper (J.-C.). Frankl. Inst. J. *62* (1871) 368.
40 46 Dziobek (W.). « Uber den photometrischen Anschluss der Wolfram-Vacuumlampe an die Kohlefadenlampe ».
Z. f. I. *46* (1926) 476 et 586.
40 *bis* 46 — « Die Frage der Lichteinheit (Hefnerkerze und Internationale Kerze) ».
Licht und Lampe *17* (1928) 77.
41 26 Eitner (F.). (Etalon à la benzine).
J. G. W. *24* (1881) 723, *28* (1885) 709.
42 41 Fabry (Ch.). « Emploi de la lampe à incandescence comme étalon photométrique ».
Ecl. El. *37* (1903) 411.
43 48, 50 — « Une solution pratique du problème de la photométrie hétérochrome ».
C. R. *137* (1903) 743. Ill. Eng. Soc. Trans. (1914) 796 ; (1915) 283.
44 48 — « La photométrie hétérochrome ».
C. I. E. (1921) 106 ; (1924) 184 et (1928) 1155.
Rev. Gén. El. *16* (1924) 833, *24* (1928) 815.
45 32 — « Rapport sur l'étalon photométrique à utiliser pour la sensitométrie des plaques photographiques ».
Congrès Photog. (1925) 78.
Rev. Opt. *4* (1925) 534.

46 31 Fabry (C.), Roux (L.) & Perrin (E.). « Étalon de lumière pour la mesure des lampes au néon ».
Rev. Opt. 8 (1929) 1

47 70, 93 Fairchild (C.-O.), Hoover (W.-H.) & Peters (M.-F.). « A new determination of the melting point of palladium. »
B. Stand. J. Res. 2 (1929) 931.

48 26 Féry (C.). « Sur un nouvel étalon lumineux ».
C. R. 126 (1898) 1192.
Ecl. El. 15 (1898) 263

49 27 — « Nouvel étalon à acétylène ».
J. de Phys. 3 (1904) 529.

50 70 — (Pouvoir absorbant des cônes).
C. R. 148 (1909) 777.

51 60 Féry & Chéneveau. « Sur la température de fusion du platine ».
C. R. 148 (1909) 401.

52 31 Fleming. « The photometry of electrical lamps ».
Inst. El. Eng. J. 32 (1903) 119.

53 80 Fleury (P.). « Four à résistance de molybdène dans le vide ».
C. R. 175 (1922) 881.

54 IX — « Les étalons d'intensité lumineuse ».
Soc. Franç. El. Bull. 5 (1925) 700.

55 60, 81 — « Recherches sur le rayonnement du corps noir en vue de son
89 emploi comme étalon primaire d'intensité lumineuse ».
Ann. de Phys. 5 (1926) 205.

56 63 Forrest (J. F.) (Arc-étalon).
Electrician 71 (1913) 7'9 et 1007.

57 32, 60 Forsythe (W. E.) (Température de couleur des lampes au tungstène)
Astrophys. J. 34 (1911) 353.

58 32, 41 Forsythe (W. E.) & Worthing (A. G.). « The properties of tungsten and the caracteristics of Tungsten Lamps ».
C. I. E. (1924) 100 :
Astrophys. J. 61 (1925) 146.

59 27 Fouché (Emploi de la flamme d'acétylène comme étalon).
Congrès international de l'acétylène 4 (1903) 94.

60 22 Gas Referees. Instruction pour l'emploi de l'étalon Vernon-Harcourt (1901) reproduites par Liebenthal, p. 129.
V. aussi « Notification of the Metropolitan Gas Referees for the year 1916 (publié par H. M. Stationnery Office).

61 46 Geiss (W.). « Der Umrechnungsfaktor der internationalen zur Hefnerkerze bei der Farbe der Gasfüllungslampe. »
Bull. Schweiz. Elek. Ver. (1928) n° 6.

62 67 Gibson (K.S.) & Tyndall (E. P. T.) « Visibility of radiant energy. »
B. Stand. Bull. (1923).
C. I. E. (1924) 232.

63 26 Girond (H.). (Étalon au gaz d'éclairage).
J. us. gaz 6 (1882) 1612. V. aussi Palaz p. 127.

64 23, 25 Glazebrook « The photometric standard of the national physical laboratory. »
Brit. Ass. Rep. (1908) 633.
Electrician 61 (1908) 933.

65 65 GUILLAUME (C. E.). (Corps noir au point de fusion du platine).
Bul. El. 8 (1896) 55.

66 22 GRAFTON (W.). (Étalon Vernon Harcourt)
J. of gas Light. 83 (1903) 771.

67 16 HARTLEY (F. W.). (Lampe Carcel).
J. us. gaz 6 (1882) 1512.

68 01 HARWOOD (W. A.) & PETAVEL (J. E.). « Travail expérimental sur un nouvel étalon de lumière. »
Roy. Soc. Proc. 86 (1912) 409.

69 16 HEFNER-ALTENECK (F. von) « Vorschlag zu Beschaffung einer constanten Lichteinheit. »
E. T. Z. 5 (1884) 20 ; 7 (1886) 138.
J. G. W. 27 (1884) 73, 706, 793 ; 29 (1886) 3 ; 30 (1887) 489.
Berlin. Ber. (1888) 980.

69 *bis* 17 — J. G. W. 34 (1891) 249.

70 80 HOFFMANN. (Rapport des brillances spectrales du corps noir aux points de fusion du platine, du palladium et de l'or).
Z. f. Phys. 27 (1924) 285.

71 70, 80, 93 — & MEISSNER « Brillance (monochromatique) relative du corps noir aux points de fusion de l'or et du palladium. »
Ann. der Phys. 60 (1919) 201.

72 22, 46 HOLST (G.), G[illegible] (W.) & HALBERTSMA (N. A.) « The accuracy of photometry »
C. I. E. (1928) 1068.

73 9, 26, 42 HYDE (E. P.) « A comparison of the unit of luminous intensity of the United States, with those of Germany, England and France. »
B. Stand. Bull. 3 (1907) 65.

74 32 HYDE (E. P.), FORSYTHE (W. E.) & CADY (F. E.) « Color temperature scales for Tu & C. » Phys. Rev. 10 (1917) 395.

75 26 — — — « On the distribution of energy in the visible spectrum of a cylindrical flamme of acetylene ».
Phys. Rev. 13 (1919) 157 ; 14 (1919) 379.
Frankl. Inst. J. 188 (1919) 129.

76 46 — — — (Critique de la méthode de papillotement). Astrophys. J. (1918)

77 68, 80, 89 — — — « Nouvelle détermination expérimentale de la brillance du corps noir et de l'équivalent mécanique de la lumière. » Phys. Rev. 13 (1919) 45.

78 03 HYDE (E. P.) & FORSYTHE (W. E.) « The Gold-Point, Palladium point brightness ratio. »
Astrophys. J. 51 (1920) 244.

79 4 IVES (H. E.). Astrophys J. 36 (1912) 322. Frankl. Inst. J. 180 (1915) 409.

79 *bis* 46 Phil. Mag. 24 (1912) 149, 352, 744, 845, 853.

80 69, 71, 106 — « A primary standard of light, following the proposal of Waidner & Burgess. »
Frankl. Inst. J. 197 (1924) 147 et 359. Résumé dans C. I. E. (1924) 77.

81 67 — « The luminous properties of the black body. »
Opt. Soc. Am. J. 12 (1926) 75.

82 47, 48 Ives (H. E.) & Kingsbury. (Photométrie hétérochrome).
50 Illum. Eng. Soc. Trans. *9* (1914) 795 ; *10* (1915) 203, 253.
83 71 — — . Phys. Rev. *8* (1916) 177.
Frankl. Inst. J. *186* (1918) 122.
84 0, 28 Janet (P.) « Note relative à l'unification des intensités lumineuses. »
44 Lum. El. *6* (1909) 275.
Soc. Int. El. Bull. *9* (1909) 283.
85 27 Jones (L. A.). (Étalon Eastman-Kodak).
Illum. Eng. Trans. *9* (1914) 716.
J. of Gas Ligth. *128* (1914) 430.
86 40, 47 Jouaust (R.) « Sur l'emploi des écrans absorbants en photométrie hétérochrome. »
C. I. E. (1924) 232.
Rev. Gén. El. *16* (1924) 571.
87 32 — « La lampe à incandescence, employée comme étalon d'intensité lumineuse & comme étalon sensitométrique. »
Congrès Photog. (1925) 91.
87 *bis* 21 — « Revue des principaux travaux sur la photométrie en 1929-1930 ».
Soc. Franç. El. Bull. *10* (1930) 1216.
88 47 Jouaust & Waguet « Emploi d'écrans colorés en photométrie hétérochrome. »
Rev. Opt. *6* (1927) 56.
89 25 Keates (Étalon à l'huile de paraffine).
J. of Gas Ligth. *18* (1869) 161.
90 64 Kirchhoff. (Corps noir).
Pogg. Ann. *109* (1860) 275.
90 *bis* 63 Kohn & Guckel. (Brillance du cratère de l'arc au carbone).
Z. f. Phys. *27* (1924) 305.
91 46 König (E.) & Buchmüller (F.) « Photometrische Vergleichsmessungen zwischen dem National Physical Laboratory (England) und dem Eidg. Ant. für Mass und Gewicht in Bern. »
Bull. Schweitz. Elek. Verb. (1927) n° 2.
92 14 Krüss « Expériences comparatives avec des bougies-étalons. »
J. G. W. *26* (1883) 211.
Lum. él. *12* (1884) 191.
93 11 — (Balance pour mesurer la consommation des bougies).
J. G. W. *28* (1885) 348.
Lum. El. *16* (1885) 619.
94 11 — (Echelle optique pour mesurer la hauteur des flammes).
J. G. W. *26* (1883) 717.
95 44 Langmuir (I.). « Les caractéristiques des filaments de tungstène en fonction de la température ».
Phys. Rev. *7* (1916) 302.
96 17, 28 Laporte (F.). « Comparaison de la lampe Carcel & de la lampe Hefner ».
31 Ecl. El. *15* (1898) 295.
97 9, 16 — « Les étalons lumineux et les décisions de la Commission Internationale de photométrie. (Réunion de Zürich, 1907.) »
28 Ecl. El. *53* (1907) 445.

98 28 Laporte (F.) & Jouaust (R.). (Valeur relative des étalons Carcel, Hefner & Vernon-Harcourt).
Soc. Int. El. Bull. *6* (1906) 375.
99 30 Leder. (Température de couleur de la lampe Hefner).
Ann. der Phys. *54* (1917) 319.
100 18 Liebenthal (E.). (Étalon Hefner).
E. T. Z. *8* (1887) 504, *9* (1888) 90.
101 61 — (Essais sur étalon Siemens).
E. T. Z. *9* (1888) 445.
102 17, 25 — E. T. Z. *9* (1888) 478.
103 16, 18, 20, 22, 31 — « Über die Abhängigkeit der Hefnerlampe und der Pentanlampe von der Beschaffenheit der umgebenden Luft ».
Z. f. I. *15* (1895) 157.
Ind. El. *5* (1896) 348.
104 28 — J. G. W. *49* (1906) 559.
105 29 — « Influence de la pression atmosphérique sur l'étalon Hefner ».
Z. f. I. 43 (1923) 209.
106 17 Löwenherz (L.). (Lampe Hefner).
J. G. W. *34* (1891) 509.
107 57 Lummer (O.). Tätigkeitsberichte der physikalisch-technischen Reichsanstalt
Z. f. I. *11* (1891) 161, *14* (1894) 207.
108 31 Lummer (O.) & Brodhun. Z. f. I. *10* (1890) 119.
109 61 — & Kurlbaum. Z. f. I. *13* (1893) 120.
110 61, 97 — — — (Recherches sur l'étalon de lumière).
E. T. Z. *15* (1894) 475.
Ecl. El. *2* (1894) 311.
111 80 — — — « Corps noir chauffé électriquement ».
Ann. der Phys. *5* (1901) 829.
Phys. Ber. *17* (1898) 106.
112 68, 80 Lummer (O.) & Pringsheim. « Détermination des températures à l'aide des lois du rayonnement (jusqu'à 2300° K) ».
Phys. Z. *3* (1901) 97.
Phys. Ber. *5* (1903) 3.
113 44 Mac Gregor-Morris, Buckley, Dow & Dudding. « Survey on photometric accuracy in Great Britain ».
C. I. E. (1928) 1091.
114 70 Mendenhall. « Pouvoir émissif des cavités en forme de coin, leur usage pour la mesure des températures ».
Astrophys. J. *33* (1911) 91.
115 32 Mendenhall & Forsythe. (Température de couleur des lampes au tungstène)
Phys. Rev. *4* (1914) 62.
116 93 Mendenhall & Uttenback. « The use of the wire-method for the melting-point of palladium ».
Opt. Soc. Am. J. *15* (1927) 68.
117 26 Methven (J.). (Étalon au gaz d'éclairage carburé).
J. of Gas Light. *39* (1878) 94, *40* (1882) 42.
J. de Gaz *7* (1883) 1887.

118 67 Meyer. « Rayonnement lumineux du corps noir entre 1000 & 10000° K ».
Phys. Ber. *17* (1916) 384.
— « Transformation de l'énergie en lumière par l'intermédiaire des corps incandescents ».
E. u. M. *39* (1921) 301 et 316.

119 14 Monnier. (Bougies)
Soc. Techn. de l'Ind. du Gaz. C. r. *10* (1883) 312.

120 69, 94 Müller (C.). « Bestimmung des Konstanten c ».
Z. f. I. *42* (1922) 69, 43 (1923) 64, *44* (1924) 118, *47* (1927) 330.

121 69, 80, 93 — « Uber die Realisierung einer rationellen Lichteinheit mit Hilfe absoluter Messung der Gesamtstrahlung ».
C. I. E. (1928) 1116
Z. f. Phys. *47* (1928) 761.

122 69, 95 — « Lichteinheit. »
Z. f. I. *42* (1922) 69 et 70 ; *44* (1924) 110 ; *46* (1926) 178 ; 47 (1927) 331.
Z. f. Bel. *28* (1922) 76 et 80, 130.
Z. f. Phys. *34* (1925) 824.

123 69, 96 Muller (C.) & Frisch (B.). « Uber die Realisierung der Warburg'schen rationellen Lichteinheit. »
C. I. E. (1928) 1123.

124 68, 80 Nernst « Détermination des hautes températures. »
Phys. Z. 4 (1903) 733.

124 *bis* 68 — « Brillance du corps noir. »
Phys. Z. 7 (1906) 380.

125 16 Palaz (A.). (Etalon Violle)
Lum El. 34 (1889) 51.

126 13, 16, 19, 20, 22, 26, 29 Paterson (C. C.). « Some investigations of the 10 c. p. Harcourt pentane lamp ».
Electrician *53* (1904) 752.

127 31 — « Investigation on light standards ».
Inst. El. Eng. J. *38* (1906) 271.
— « Etude sur les étalons lumineux et l'état actuel des lampes à incandescence à haut voltage. »
Ecl. El. *50* (1907) 324 et 398.
Electrician *58* (1907) 500.
N. P. L. Coll. Res. *3* (1908) 47.

128 25, 45, 46 Paterson (C. C.). & Dudding (B. P.). « The unit of Candlepower in white light. »
Phil. Mag. *30* (1915) 63.
Phys. Soc Proc. *27* (1915) 263.

129 22 Perot (A.). & Janet (P.). Bulletin du laboratoire d'essais (1906).

130 16, 28 Perot (A.). & Laporte (F.). « Sur la valeur relative des étalons Carcel, Hefner & Vernon Harcourt. »
C. R. *143* (1906) 743

131 57, 60 Petavel (J. E.). « Recherches expérimentales sur quelques étalons de lumière. »
Roy. Soc. Proc. *65* (1899) 469.

132 61 — Brit. Ass. Rep. (1902) 534.
Electrician 50 (1903) 1012

133 46 PIRANI & DZIOBEK. « Ueber einen Versuch zur Ueberbrückung des Farbensprunges bei der Photometrie elektrischer Glühlampen ». World Engineering Congress. Tokio (1929). Publication n° 414.

133 *bis* 07 PIRANI & MIETHING. « Rayonnement, température & brillance du corps noir ».
Phys. Ber. *17* (1936) 219

134 31 PREECE, Roy. Soc. Proc. *36* (1884) 272.

135 50 PRIEST (I.). « A proposed method for the photometry of different colors ».
Phys. Rev. *9* (1917) 341, *10* (1917) 208.
— « The colorimetry and photometry of daylight and incandescent illuminants by the method of rotary dispersion ».
Opt. Soc. Am. J. *7* (1923) 1175.

136 8,16,17 REICHSANSTALT (PHYSIKALISCH-TECHNISCHE). « Die Beglaubigung der Hefnerlampe ».
Z. f. I. *13* (1893) 257.
Ind. El. *5* (1896) 413.
Liebenthal, p. 411.

137 44,46 — « Photometrische Prüfungen ».
Z. f. I. *33* (1913) 63 ; *45* (1925) 223 ; *46* (1926) 178.

138 38,48 RIBAUD (G.). « Lampes pyrométriques étalon. Réalisation d'un étalon pyrométrique de précision ».
J. de Phys. *7* (1926) 23 S.

139 38,49 — « Influence de la température extérieure sur la température des lampes pyrométriques étalons ».
C. R. *182* (1926) 620.

140 73,79,93 RIBAUD (G.) & NIKITINE (S.). « Réalisation du corps noir au point de fusion du palladium par la méthode du tube ».
Ann. de Phys. *11* (1929) 451.
C. R. *188* (1929) 618.

141 IX RICHTMYER & CRITTENDEN (E.-C.). « The precision of photometric measurements ».
Opt. Soc. Am. J. *4* (1920) 371.

142 IX, 41 ROSA (E.-B.). « Étalons & unités photométriques ».
Lectures on Illuminating Engineering, John Hopkins University (1910) I. 387.

143 11,16,17,18,24,28,38 ROSA (E.-B.) & CRITTENDEN (E.-C.). « Flame standards in photometry ».
B. of Stand. Bull. *10* (1914) 557.

144 20,28 ROSA (E.-B.), CRITTENDEN (E.-C.) & TAYLOR (A.-H.). Ill. Eng. Soc. Trans. *10* (1915) 843.
J. of Gas Light. *134* (1916) 178.

145 28 — — — — & — — . Opt. Soc. Am. J. *5* (1921) 444.

146 13,30 SCHWENDLER. « On a new Standard of light ».
Phil. Mag. *8* (1879) 392.
Résumé par Crova : J. de Phys. *9* (1880) 135
Lum. El. *2* (1880) 189.

147 28 Sharp (C.-H.). (Note sur la flamme d'acétylène dans l'oxygène).
Am. I. E. E. Trans. *19* (1902) 51.
Ecl. El. *31* (1902) 79.
148 13 Sharp & Turnbull. « Étude bolométrique des étalons photométriques »
Phys. Rev. *2* (1894) 1.
Ecl. El. *2* (1895) 323.
149 60, 71 Siemens (W. Von). (Étalon à ruban de platine)
E. T. Z. *5* (1884) 244.
J. de Phys. *4* (1885) 533.
149 *bis* 1 Steinmetz (C.P.) Am. I.E.E. Trans. *27* (1908) 1819.
150 62 Swinburne (J.) & Thompson (S.-P.). (Arc-étalon).
Electrician *31* (1893) 502.
151 25 Takatsu (K.) & Tanaka (M.). (Lampe Vernon-Harcourt)
Electrotechn. Lab. Tokyo (1917).
Electrician *80* (1918) 846.
152 93 Tardy (L.-H.). « Remplacement de l'œil par la cellule photoélectrique sur les spectrophotomètres visuels ».
Rev. Opt. *7* (1928) 189.
153 48 Taylor (A.-H.). « Emploi des filtres colorés en photométrie hétérochrome ».
C. I. E. (1921) 133.
154 46 — « The validity of flicker photometer measurements in heterochromatic photometry ».
Opt. Soc. Am. J. *13* (1926) 193.
155 52 Thele (R.P.) « Gas filled lamps as photometric standards ».
Trans. I.E.S. *25* (1930) 78.
155 *bis* 62 Thompson. (Arc étalon).
Int. El. Cong. Chicago Proc. (1893) 267.
Phil. Mag. *36* (1893) 120.
Lum. él. *50* (1893) 129.
156 34, 37 Tikhodeev. « L'étalon de lumière de l'U. R. S. S. ».
Annales de la Chambre centrale des poids & mesures de l'U. R. S. S. (1928).
157 62 Trotter. Roy. Soc. Proc. *56* (1894) 262.
158 26 Uppenborn (F.) (Recherches sur le bec Giroud & la lampe à benzine).
Zentralblatt f. Elektrot. *10* (1888) 186.
Lum. El. *28* (1888) 330.
159 30 Valentiner & Rössiger « Répartition d'énergie du rayonnement de la lampe Hefner dans le spectre visible. »
Ann. der Phys. *76* (1925) 785.
160 22 Vernon-Harcourt (A. G.) (Étalon en pentane).
Brit. As. Rep. — Plymouth (1877) 51.
Chem. News *36* (1877) 103.
J. G. W. *29* (1879) 43.
Lum. El. *28* (1888) 480.
161 22 — Brit. As. Rep. (1883) 426; (1885) 916; (1888) 44; (1894) 502.
J. de Phys. *3* (1884) 410.

162 23 — Brit. Ass. Rep., Manchester (1887) 617.
Lum. El. 26 (1887) 478.

163 81, 23 — « On a 10 candle lamp to be used as a standard of light. »
Brit. Ass. Rep., Bristol (1898) 845.
J. G. W. 41 (1898) 653.

164 8, 84 Violle (J.) « Étalon absolu de lumière. »
C. R. 88 (1879) 171 ; 98 (1884) 160
Ann. Chim. & Phys. 3 (1884) 373.

165 24 — (J.) « Un étalon photométrique à l'acétylène. »
C. R. 122 (1896) 79.
Écl. El. 6 (1896) 178.
J. de Phys. 7 (1898) 193.

166 63 — (Brillance de l'arc en carbone)
C. R. 94 (1882) 28 ; 115 (1892) 1273.
J. de Phys. 2 (1893) 545.
Int. El. Cong. Chicago Proc. (1893) 250.

167 68, 70 — (J.) « Sur un étalon de lumière. »
C. R. 141 (1905) 1168.

168 1 Walsh (J. W. T.) « The measurement of light ».
Phil. Mag. 44 (1922) 1163.

169 70, 80 Waidner & Burgess. (Corps noir à température de fusion du platine)
B. Stand. Bull. 3 (1907) 163.

169 *bis* 68 — El. World 52 (1908) 625.

170 68, 95 Warburg « Une unité de lumière rationnelle. »
Deut. Phys. Ges. Verh. 19 (1917) 3.
Z. f. I. 38 (1918) 122.

171 69 Wensel, Roeser, Barbrow & Caldwell « L'étalon de lumière Waidner-Burgess. »
B. Stand. J. Res. 6 (1931) 1103

172 64 Wien & Lummer. (Corps noir).
Pogg. Ann. 56 (1895) 451.

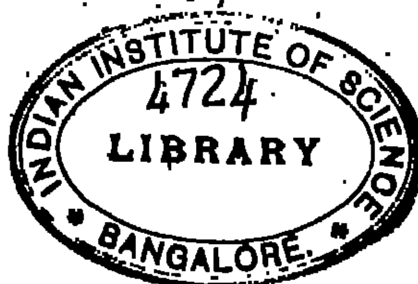


TABLE DES MATIÈRES

Pages.

CHAPITRE V.

Le « corps noir » étudié en vue de son emploi comme étalon primaire photométrique.



BAR-LE-DUC. — IMPRIMERIE CONTANT-LAGUERRE.